

**TIEMPO DE RESIDENCIA, CONDICIÓN LIMNOLÓGICA Y CALIDAD DE  
AGUA DEL EMBALSE LA CHAPA SANTANA – BOYACÁ**

**LEANA BANEZA MOLINA PACHECO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
UNIDAD DE ECOLOGIA Y SISTEMAS ACUATICOS - UDESA  
TUNJA  
2018**

**TIEMPO DE RESIDENCIA, CONDICIÓN LIMNOLÓGICA Y CALIDAD DE  
AGUA DEL EMBALSE LA CHAPA SANTANA – BOYACÁ**

**LEANA BANEZA MOLINA PACHECO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
ingeniera Ambiental**

**Director**

**CARLOS ALEJANDRO DÍAZ BALLESTEROS**

**Mg Ingeniería civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio  
ambiente**

**Codirector**

**NELSON JAVIER ARANGUREN RIAÑO**

**PhD. Ciencias-Biología**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**UNIDAD DE ECOLOGIA Y SISTEMAS ACUATICOS - UDESA**

**TUNJA**

**2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del director

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, mayo de 2018

“La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde de la opinión expresada en este proyecto”.  
Se autoriza la reproducción total o parcial indicando su origen.

## **Dedicada**

*A mi familia por ser la base de la construcción de mi ser, el ejemplo de la perseverancia, la fortaleza, el emprendimiento y el amor.*

*A mi madre Patricia por enseñarme a ser una mujer fuerte, decidida e inteligente. Mostrarme y ser ejemplo de la compasión, la bondad y la esperanza de construir un mundo mejor, compartir conmigo una lagrima, una sonrisa, un café, ser mi confidente y amiga.*

*A mi padre Pablo por ser la representación materializada del liderazgo, por enseñarme a seguir mis sueños, por darme la oportunidad de cumplirlos, por compartir el amor a viajar y mostrarme que los momentos más difíciles de la vida se pasan junto a tu familia.*

*A mi hermano Fabián David por crecer junto a mí, tomando mi mano para seguir el mismo camino, preparándome para el momento de soltarla. Por ser el ejemplo de la nobleza, la inteligencia, la caballerosidad y la alegría.*

*A mi hermano Juan David por enseñarme a ser una niña otra vez, a descubrir y sorprenderme de nuevo, ser la fuente de la ternura y de la creatividad, compartir el amor a la música y ser increíblemente curioso.*

*A mis abuelas Ana maría y Olimpia, por darme momentos de ternura, cariño, apoyo y preocupación, por ser mujeres increíblemente fuertes, por homenaje a sus vidas que demuestran el empoderamiento femenino desde el amor a su familia.*

*A la naturaleza, la ciencia y el arte, que crean una combinación armónica y sutil de la felicidad*

*A mis amigas de toda la vida Luz Helena Sainea y Gretel Rodríguez, por compartir un camino lleno de aventuras, de complicidad, de reciprocidad y de empatía.*

*A mis amigos, Zahia Merchán por compartir este proceso, ser el apoyo, la compañía y la fuente de seguridad en momentos de indecisión. A Gabriela Fuentes y Mónica Díaz, por ser la descripción de locura y sensatez combinada en una sola persona. A Pablo Guerrero por ser la fuente de sabios consejos y compañía en esta etapa.*

*Al universo por permitir coincidir en el espacio y en el tiempo*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por ser el espacio generador del conocimiento, la investigación, la ciencia y el arte.

A mis directores: Ing. Carlos Alejandro Díaz Ballesteros, profesor de la facultad de ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y Nelson Aranguren Riaño, profesor de la Facultad de Ciencias, escuela de Biología de Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; por su asesoría, acompañamiento, paciencia, apoyo y dedicación en el desarrollo de este proyecto.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Ambiental, quienes hicieron parte de mi formación humana y profesional, especialmente a los profesores Álvaro Guevara y Ligia Tarazona, por asesoramiento en la ejecución del proyecto.

A la escuela de ingeniería ambiental encabezada por el Ing. Helver Parra por permitir los espacios para la ejecución y finalización de este proceso.

Al laboratorio de Ingeniería Ambiental, encabezado por el Ing. Orlando Vergel Portillo, por permitir el espacio para la ejecución de la fase experimental.

A los laboratoristas Julián y Nataly por prestar acompañamiento y guía constante en los procesos de análisis de laboratorio.

Al laboratorio de Biología ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, encabezado por la profesora Luz Marina, y el Biólogo David Hernández, por su asesoramiento y acompañamiento en el análisis de parámetros microbiológicos.

Al ingeniero Julián Villate profesor de la facultad de ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por sus aportes en pro de la realización del proyecto de investigación.

A los integrantes del grupo de investigación UDESA, de la línea de Cambio Climático de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por su acompañamiento y apoyo en la fase de campo, su valiosa amistad, sus aportes constantes al proyecto y por compartir la naturaleza interespecífica de la felicidad.

A la perseverancia y lucha del ser humano por alcanzar sus metas y sobrepasar sus miedos.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEORICO	20
2.1 EMBALSES	20
2.1.1 Zonas de un embalse	21
2.1.2 Zonación de un lago	22
2.1.3 Diferencias entre lagos y embalses.	22
2.2 TIEMPO DE RESIDENCIA	23
2.3 PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.	24
2.3.1 Conductividad	25
2.3.2 Alcalinidad	25
2.3.3 Potencial de hidrogeno	26
2.3.4 Temperatura – calor	26
2.3.5 Color	26
2.3.6 Oxígeno disuelto (OD).	27
2.3.7 Nitratos	27
2.3.8 Demanda química de oxigeno DQO	28
2.3.9 Fosfatos	28
2.3.10 Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO	28

2.3.11 Solidos totales	28
2.3.12 Dureza	29
2.3.13 Coliformes totales y fecales	29
2.4 CALIDAD DEL RECURSO HIDRICO	29
2.5 ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA	30
2.5.1 Índice NSF 1989	30
2.6 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA CON RESPECTO A SU USO	32
3. METODOLOGÍA	35
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	35
3.1.1 Generalidades	35
3.1.3 Hidrografía	38
3.1.2 Recopilación de información Climatológica utilizada para el estudio.	40
3.2 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA	43
3.2.1 Batimetría	43
3.2.2 Balance hídrico en el embalse la chapa	43
3.2.3 Estimación de la precipitación en el área de estudio	44
3.2.4 Estimación de la evaporación en el área de estudio	44
3.2.5 Estimación de la esorrentía de la quebrada La Chapa hacia el embalse	44
3.3 MÉTODO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS LIMNOLÓGICOS Y FÍSICO QUÍMICOS	46
3.3.2 Medición de parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua en el embalse La chapa	46
3.3.3 Localización de puntos de muestreos de los parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua	47



3.3.4 Medición de parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua en la quebrada La chapa	48
3.3.5 Metodología de evaluación de parámetros físico químicos en el laboratorio	49
3.7 ESTADO TRÓFICO	49
3.8 APLICACIÓN DE LOS INDICES DE CALIDAD DE AGUA EN EL EMBALSE LA CHAPA.	50
3.8.1 INSF 1978	50
3.8.2 DINIUS	51
4. RESULTADOS	52
4.1 BATIMETRÍA Y ESTIMACIÓN DE VOLUMEN	52
4.2 BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE LA CHAPA.	53
4.2.1 Precipitación en el área del embalse	53
4.2.2 Evaporación potencial en el área del embalse	55
4.2.3 Escorrentía	56
4.2.4 Fenómenos controlados entradas y salidas	56
4.3 BALANCE HIDRICO Y TIEMPOS DE RESIDENCIA EN EL EMBALSE LA CHAPA POR MOMENTOS HIDROLOGICOS.	57
4.4 RESULTADOS DE CARACTERÍSTICAS LIMNOLOGICAS, FÍSICO – QUÍMICAS.	59
4.4.2 Quebrada La Chapa Índice NSF 1984	60
4.4.3 Descripción	60
4.4.4 El índice de calidad de agua NSF muestra un rango de calidad	61
4.4.5 Descripción	61
4.5.1 Momento Hidrológico: Transición de alto – bajo	61
4.5.2 Condiciones generales del sistema	61

4.5.7 Índice DINIUS	64
4.5.8 Momento Hidrológico: Bajo	65
4.5.9 Índice NSF 1984	67
4.5.9 Momento hidrológico: Transición bajo – alto	68
4.6 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL EMBALSE LA CHAPA.	74
4.7 INDICE DE ESTADO TROFICO	77
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.1 MOMENTOS HIDROLÓGICOS	78
5.2. RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL EMBALSE LA CHAPA	80
5.3. ESTADO TRÓFICO	81
5.4. INDICES DE CALIDAD DE AGUA	82
6. CONCLUSIONES	84
7. RECOMENDACIONES	86

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Zonas generales en un embalse	21
Tabla 2. Diferencias Lagos y Embalses	23
Tabla 3. Usos potenciales del recurso hídrico, criterios de calidad	32
Tabla 4. Datos climatológicos de la estación Monquirá en un periodo de 20 años	38
Tabla 5. Información de estaciones utilizadas en el estudio	41
Tabla 6. Método utilizado en el laboratorio	49
Tabla 7. Descripción momentos hidrológicos	52
Tabla 8. Datos de volumen, área, cota por momento hidrológico	53
Tabla 9. Precipitación media mensual en el área del embalse	54
Tabla 10. Evaporación media mensual	55
Tabla 11. Resultados escorrentía método SCS	56
Tabla 12. Escorrentía mensual	56
Tabla 13. Caudal entrada quebrada La Chapa	57
Tabla 14. Salidas embalse La Chapa	57
Tabla 15. Balance hídrico momentos hidrológicos embalse La Chapa	57
Tabla 16. Características generales Quebrada La chapa. Momento transición bajo – alto.	59
Tabla 17. Resultado índice NSF 1984	60
Tabla 18. Resultado índice Dinius	61
Tabla 19. Condiciones generales del sistema Febrero	62
Tabla 21. Resultado índice NSF 1984	63

Tabla 22. Resultado índice Dinius	64
Tabla 23. Características generales	65
Tabla 23. Resultado índice NSF 1984	67
Tabla 24. Resultado índice Dinius	67
Tabla 23. Características generales	68
Tabla 25. Resultado índice NSF 1984	70
Tabla 26. Resultado índice Dinius	70
Tabla 27. Características generales	71
Tabla 29. Resultado índice NSF 1984	73
Tabla 30. Resultado índice Dinius	73
Tabla 31. Valores de correlación entre variables por componentes	76
Tabla 32. Valor índice de estado trófico por momentos hidrológicos	77

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Precipitación mensual estación Comoda La 1960 – 2016	37
Gráfica 2. Precipitación media multianual de las estaciones seleccionadas para el estudio.	38
Graficas 3 y 4. Oxígeno disuelto vs profundidad	62
Gráficas 5 y 6. Perfiles de temperatura	63
Gráficas 7 y 8. Perfiles de oxígeno	66
Gráficas 9 y 10. Perfiles de temperatura	66
Gráficas 11 y 12. Perfiles de oxígeno	69
Gráficas 13 y 14. Perfiles de temperatura	69
Graficas 15 y 16. Perfiles de oxígeno	72
Gráficas 17 y 18. Perfiles de temperatura	72

## LISTA DE IMAGENES

	pág.
Imagen 1. Localización del municipio de Santana – embalse La chapa	36
Imagen 2. Delimitación cuenca abastecedora embalse La Chapa.	39
Imagen 3. ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio, ubicación municipio de santana.	42
Imagen 4. Puntos de muestreo para el Índice de Calidad	47
Imagen 6. puntos georreferenciados dentro del embalse, mapa raster, curvas de nivel	52
Imagen 7 y 8. Mapa Raster estaciones datos precipitación	53
Imagen 9. Isoyetas dentro del área de estudio (febrero).	54
Imagen 10 y 11. Isoyetas de precipitación para febrero y marzo.	54
Imagen 12 y 13. Isoyetas en el área del embalse abril y mayo	54
Imagen 15. BILOT Análisis de componentes principales	74
Imagen 16. Barras de correlación componente 1	75
Imagen 17. Barras de correlación componente 2.	75

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Pesos utilizados para el índice NSF 1984	93
Anexo B. Ecuaciones índice DINIUS	94
Anexo C. Clasificación de calidad de agua según uso DINIUS	95
Anexo D. Índice de Carlson para estado trófico IET	96
Anexo E. Clasificación de calidad de agua índice NSF 1984 – DINIUS	97
Anexos F. Imágenes de campo medio magnético	98

## RESUMEN

La cantidad de tiempo que el agua permanece dentro de los límites de un sistema acuático es uno de los parámetros clave que controlan el comportamiento biogeoquímico del sistema, En esta investigación se evaluó el efecto que el tiempo de residencia en un embalse tiene sobre la condición Limnológica y parámetros de calidad de agua en función de uso, donde se determina la relación de los eventos climáticos de la región con la variación del tiempo de residencia y de los parámetros físico químicos. Como objeto de estudio se tomó el embalse la chapa localizado en el municipio de Santana Boyacá, con un área de 4260 m<sup>2</sup> y una elevación de 1627m, región la cual presenta un comportamiento bimodal.

Los resultados indicaron tiempos de residencia diferentes asociados a cada uno de los momentos hidrológicos dentro del área del embalse la chapa, que presentan diferencias en precipitación, evaporación, escorrentía, caudales de entrada, caudales de salida y volumen, los tiempos de residencia se encuentran principalmente definidos por los eventos de precipitación, cada momento evidencia variaciones importantes en las concentraciones de sólidos totales, dureza, alcalinidad y fosfatos con relación en cada uno de los momentos y se relaciona un tiempo de residencia bajo a un alto grado de calidad de agua.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchos de los conflictos mundiales están relacionados con el agua. Las dificultades con respecto a la calidad, protección de las fuentes y el uso racional, asociado a la necesidad de suplir a la humanidad con un recurso adecuado de agua, incrementan la necesidad de la investigación y conocimiento en este tema<sup>1</sup>.

Los sistemas acuáticos continentales, Lóticos: Ríos, Quebradas, Arroyos entre otros y Lénticos: Lagos, lagunas, entre otros, cubren aproximadamente el 2% de la superficie terrestre es decir  $2.5 \times 10^6 \text{ Km}^2$ <sup>2</sup>, a pesar de esto conflictos como la distribución, demanda y a la calidad del recurso hídrico hacen necesario el diseño e implementación de sistemas acuáticos artificiales como son los embalses. Alrededor de los años 30 en Colombia, como solución a muchos de estos conflictos se construyeron los primeros embalses, que hacen referencia a cuerpos de agua que han sido creados por actividades humanas, para diferentes propósitos, como almacenamiento, control de inundaciones, generación de energía eléctrica y recreación. Debido a sus características estos tipos de sistemas han llegado a considerarse mixtos y no únicamente lenticos, es decir, como un híbrido entre un Río y un Lago<sup>3</sup> un ejemplo de este es el embalse la Regadera, diseñado para abastecer de agua a Bogotá. A partir de la implementación de este tipo de sistemas, se desarrolla el interés y la preocupación por los efectos ambientales y se comienza a tratar desafíos científicos y técnicos para garantizar mejores niveles de calidad de agua. Lo que hace necesario contar con una serie de conocimientos ecológicos de estos cuerpos de agua, los cuales son limitados debido a que la información que se ha obtenido de algunos de los embalses no puede ser extrapolada a otros, en donde las condiciones ambientales que determinan los comportamientos ecológicos son diferentes<sup>4</sup>.

Varios factores influyen en la limnología de los sistemas acuáticos, en el caso de los embalses, el factor más relevante que puede definir las propiedades físicas, químicas y biológicas, es el tiempo de residencia<sup>5</sup>, que se define como la medida de retención de masa de agua dentro de límites definidos<sup>6</sup>, aunque

---

<sup>1</sup>MAYS, Larry. Water Resources Engineering: Second Edition. Tempe Arizona: John Wiley & Sons, Inc, 2010. p.890.

<sup>2</sup> WETZEL, Robert, Limnology, Lake and River Ecosystems, Third Edition, San Diego California, Academic Press, 2001.

<sup>3</sup> MARGALEF, Ramón. Limnología. Barcelona: Ediciones Omega, S.A. 1983. p.789.

<sup>4</sup> MARQUEZ, German y GUILLLOT, Gabriel. Ecología y efecto ambiental de embalses tropicales Aproximación a casos colombianos, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Instituto de Estudios Ambientales: Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, 2001.

<sup>5</sup> ROLDAN G, RAMIREZ J, Fundamentos de limnología neotropical, 2008, 2º edición. p. 125

<sup>6</sup> RUEDA, Francisco, et al, The residence time of river water in reservoirs, Elsevier, Ecological modeling, science direct, 2005.

este factor tiene gran importancia, la investigación a nivel nacional es muy escasa teniendo en cuenta que la medición de este es un problema fundamental para la limnología aplicada<sup>7</sup>. y generalmente se tiene en cuenta únicamente el tiempo medio de residencia restando importancia a tiempos asociados a periodos climáticos, y a como se relacionan con las propiedades del agua.

Esta investigación se realizó en el embalse la Chapa el cual se encuentra ubicado en el municipio de Santana Boyacá, donde se presenta un régimen bimodal<sup>8</sup>, que corresponde a dos temporadas secas alternadas con dos temporadas de lluvias<sup>9</sup>, la primera temporada seca es menos prolongada y deficitaria que la de mitad de año y las épocas de mayores lluvias son similares, el embalse tiene un área aproxima de 4270 m<sup>2</sup> y un volumen máximo de 15500 m<sup>3</sup>, lo cual lo hace un objeto ideal de estudio ya que permite evidenciar la influencia de la variación estacional en el tiempo de residencia y en las condiciones del sistema<sup>10</sup>. además de esto cuenta con características específicas como la falta de zonas típicas, como son la zona de presa y la zona fluvial.

La caracterización de calidad del agua en el embalse es abordada desde el enfoque de uso, donde las mediciones de los parámetros físicos y químicos se relacionan con un determinado uso benéfico<sup>11</sup>, los índices de calidad de agua NSF 1985 y DINUS sugieren una expresión integrada del comportamiento de los factores naturales y representan un rango de calidad del recurso donde proponen un uso potencial dependiente de la clasificación determinada.<sup>12</sup>

---

<sup>7</sup>AMBROSETTI, Walter, et al, Residence time and physical processes in lakes, Management, Education, J. Limnol., 62 (Suppl. 1): 1-15. 2003

<sup>8</sup> ARANGO, C, et al, Climatología Trimestral del Colombia, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático, Subdirección de Meteorología – IDEAM, p. 5.

<sup>9</sup> GUZMÁN, D. et al. Regionalización de Colombia según la Estacionalidad De La Precipitación Media Mensual, a Través del Análisis de Componentes Principales (ACP), Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático – Subdirección de Meteorología –IDEAM, 2014. p.49.

<sup>10</sup> ARANGUREN-RIÑO NJ, MONROY-GONZÁLEZ JD. Respuestas del zooplancton en un sistema tropical (embalse La Chapa, Colombia) con alta tensión ambiental. Acta biol. Colomb. 2014;19 (2) :281-290.

<sup>11</sup> SIERRA, Carlos, Calidad del agua (evaluación y diagnostico), Universidad de Medellín, ediciones de la u, 1ª edición. 2011. p.115.

<sup>12</sup> Ibid. p.151.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar los posibles efectos sobre las características limnológicas generados por las variaciones del tiempo de residencia como resultado de cambios estacionales en el Embalse La Chapa, Santana – Boyacá.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estimar los tiempos de residencia en el Embalse la Chapa Santana – Boyacá para la escala asociada con los cambios estacionales conocidos de la región.

Registrar datos sobre características físicas, químicas del embalse y aplicar indicadores de calidad de agua en función de uso, durante los periodos definidos para la evaluación del Tiempo de Residencia.

Relacionar los datos obtenidos de las características físicas y químicas con el tiempo de residencia del embalse obtenido en cada muestreo y su posible incidencia sobre la calidad de agua en función de uso.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 EMBALSES

Los embalses hacen referencia a cuerpos de agua que han sido creados por las actividades humanas para propósitos específicos de la administración del agua<sup>13</sup>. Estos reservorios son ecosistemas acuáticos estratégicamente importantes ya que proveen información de bases teórico limnológicas y ecológicas dándonos un entendimiento más profundo de los problemas básicos en estas áreas, además son usados para diferentes procesos que afectan la calidad del agua, los mecanismos de operación y la sucesión de comunidades acuáticas de los ríos y las cuencas de drenaje

En este tipo de ecosistema se puede apreciar que existen similitudes en sus características y las de un lago pero que puede variar según su diseño por eso estos tipos de sistemas han llegado a considerarse mixtos y no únicamente lentos, además de esto presentan un agua más turbia, hay una mayor sedimentación, las comunidades son de composición más pobres y cambian con mayor rapidez, la biomasa es menor con una tasa de renovación más elevada <sup>14</sup>. Sin embargo las claves importantes que se deben tener en cuenta para el funcionamiento de un reservorio y sus propiedades físicas, químicas y biológicas están definidas por el tipo de construcción, el tiempo de residencia, el periodo de llenado y los impactos de los múltiples usos sobre la calidad del agua en este ecosistema <sup>15</sup>

Según Roldan y Ramírez en 2008 se deben considerar cuatro aspectos principales de un embalse<sup>16</sup>

- Cuenca Artificial: Creada por actividades humanas.
- Condición Híbrida: Río, Lago.
- Vaso reactor: Concentradores y digestores de contaminantes químicos provenientes de las vertientes
- Centro colector de eventos: Archivos de información de desarrollos económicos y cambios ecológicos.

Tundisi en 2012 propuso que el manejo de este tipo de ecosistemas se realice con base en un monitoreo continuo y la evaluación de los mecanismos de

---

<sup>13</sup> WETZEL.Op. cit., p. 37

<sup>14</sup> MARGALEF. Op. cit., p.790

<sup>15</sup> TUNDISI, Galizia y TUNDISI, Takako, Op. cit. p. 399.

<sup>16</sup> ROLDAN G, RAMIREZ J, Op. cit p.111.

operación, aunados a un entendimiento sólido de su limnología, y recomienda la aplicación de técnicas innovadoras, eco hidrología que pueda ser integrada al funcionamiento del ecosistema teniendo en cuenta que estos poseen interacciones ecológicas, económicas y sociales con la cuenca de drenaje a la que pertenecen y es un sistema complejo con muchos componentes y subsistemas que interactúan y varían a través del espacio y el tiempo.

Además de los factores que mencionan los autores que se citan anteriormente es importante reconocer y enfatizar que el tiempo de residencia, las características climáticas de la región y la localización en el continuo del Río es decir donde se ubique el embalse, en la cabecera, en la mitad o en tierra baja, determinaran temperatura, carga de materia orgánica, contenido de sales, humedad, radiación, turbidez, estratificación, biota del embalse y que dichas características van a tener una relación directa con el tiempo de residencia.<sup>17</sup>

**2.1.1 Zonas de un embalse.** Generalmente se presentan tres distintas zonas en un gradiente longitudinal: Zona fluvial o cola del embalse, Zona de transición y zona lacustre o zona de presa, cada una de estas zonas posee características físicas, químicas y biológicas únicas.

Tabla1. Zonas generales en un embalse

<b>Zonas de un Embalse</b>	
<b>Clasificación</b>	<b>Características</b>
<b>Zona Fluvial</b>	Velocidad del flujo disminuye, sedimentan las partículas de limo gruesas y de arena, poco profunda, bien mezclada, aeróbica, alta turbidez, baja penetración lumínica.
<b>Zona de Transición</b>	Se sedimentan materia orgánica particulada, Arcillas y limos gruesos y medianos, condiciones de Anoxia por el procesamiento biológico de materia orgánica particulada fina que puede agotar rápidamente el O <sub>2</sub> , Acelerada desnitrificación (Aumento de amonio).
<b>Zona Lacustre</b>	Zona más profunda, disminuye la sedimentación del material inorgánico, Penetración lumínica suficiente para presentar alta producción primaria, limitación de nutrientes, características parecidas a la de un lago.

Fuente: Roldan y Ramírez 2008

Sin embargo, existen embalses o reservorios que no poseen este tipo de zonas, ya que no cuenta con presas y las zonas se distribuyen de diferentes

<sup>17</sup> ROLDAN G, RAMIREZ J. Op. cit. p.118.

formas, con características únicas del sistema y pueden presentarse zonas parecidas a la de los lagos.

**2.1.2 Zonación de un lago.** Los lagos presentan diferentes regiones y zonaciones definidas verticalmente, las cuales presentan características propias y diferentes entre estas, primero se encuentra la interface de agua que se define como la puerta de entrada de luz y los gases al medio acuático.

La región definida como riparia o costera donde se encuentran plantas acuáticas y organismos asociados a ellas, esta zona es productora y de transferencia de detritos alóctonos como autóctonos.

La región litoral es una región ecotónica, es decir que no presenta límites definidos o que dichos límites pueden ser muy variables, esta zona se encuentra colonizada de micro algas, su tamaño es altamente variable con relación al del lago y es dependiente de las tasas de sedimentación y acumulación.

Dentro de la región litoral se encuentra la zona limnética la cual se presenta en todos los ecosistemas acuáticos, está conformada por una zona trofogénica que a su vez está dividida por zona fótica y eufótica, en esta zona se lleva a cabo la producción primaria, se presenta características de compensación donde la producción es igual al consumo, y la zona trofolítica o afótica donde se producen los procesos de mineralización y consumo, esta zona presenta una variación horizontal y sus límites llegan hasta donde ya no se produce conexión con el litoral.<sup>18</sup>

La región sublitoral o zona profunda se caracteriza por la ausencia de organismos fototróficos, por lo que es una zona totalmente dependiente de la producción de materia orgánica en las regiones litoral y de la zona limnética.

A continuación, se muestra las diferencias que se presenta entre los embalses o reservorios y los lagos.

### **2.1.3 Diferencias entre lagos y embalses.**

---

<sup>18</sup> Ibíd, p.26.

Tabla 2. Diferencias Lagos y Embalses

<b>Diferencias</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Lagos</b>	<b>Embalses</b>
Origen	Creados en tiempo Geológico, de origen natural	Origen artificial
Antigüedad	10.000 y 100.000 años	10 y 100 años
Forma	F. regular	F. Dendrítica
Localización Max. Profundidad	En el medio	Cerca de la presa (Dependiente)
Tasa de renovación	Menores	Mayor que en el lago
Sedimentación	Menor sedimentación	Mayor sedimentación
Origen de Sedimentos	Autóctonos	Aloctonos
Termoclina	Depende de su estratificación	Presenta menor gradiente se sitúa en mayores profundidades
Profundidad en la salida	Superficial en los lagos	Profunda en embalses

Fuente: Roldan Y Ramírez 2008

## 2.2 TIEMPO DE RESIDENCIA

Se define Tiempo de residencia como el tiempo promedio en que los compuestos terrestres permanecen dentro de un sistema acuático, es uno de los parámetros clave que controlan los procesos bioquímicos, se conoce que la tasa de renovación de un embalse es más rápida que la de un lago, generalmente en un embalse el agua tiende a tener menos de 1 año de tiempo de residencia; ya que el tiempo de agua retenida en un hipolimnion profundo es innecesaria debido a que puede influir de manera negativa sobre la productividad, pero este va a depender del tamaño del sistema.<sup>19</sup>

Una forma de determinar este parámetro es utilizando el cociente del volumen del reservorio o embalse y el caudal lo cual se definirá como el tiempo de retención teórica del embalse ( $V/Q$ ), también llamado tiempo de residencia, tiempo de retención hidráulica, tasa de retención o tasa de lavado.

Se presenta mediante la siguiente ecuación<sup>20</sup>

<sup>19</sup> MARGALEF, Op. cit p.790.

<sup>20</sup> TUNDISI, Galizia & TUNDISI, Takako, Op.cit p,401.

$$R = \frac{V}{Q} (\text{Días})$$

Donde

Q: diferencia entre flujo en (m<sup>3</sup>/s, hora, día, mes)

V: Volumen del reservorio o embalse (m<sup>3</sup>)

Por mayor exactitud el tiempo de residencia es calculado por año o por un periodo de tiempo más corto o suficiente dependiendo del sistema, si el nivel del agua es decir el volumen del reservorio varia significativamente, R, es calculado por separado por cada sub periodo (semana, mes) y luego se calcula el valor promedio.

El tiempo de retención es calculado en el periodo de llenado del embalse y es medido en el número de días que toma llegar a su máxima capacidad, a través del flujo o de precipitación (Que pueden diferir de los promedios durante largos periodos de observación).

Es importante tener en cuenta que las fluctuaciones en el volumen del agua no solamente afectan el tiempo de residencia, también incrementan la erosión, llevando a una mayor turbiedad y otros efectos negativos en la calidad del agua <sup>21</sup>.

El tiempo de retención es una de las principales diferencias que afectan la calidad del agua en los embalses, el cual tiende a ser más pronunciado en reservorios profundos y estratificados que en los que son someros y no presentan estratificación.

Las diferencias entre tiempos de residencia se pueden observar en la química, biología del embalse, la estratificación, la mezcla y los flujos internos.

Cuando:

- R es menor que 10 días el embalse puede considerarse como zona de Río, con alta homogeneidad en tasas de flujo y en distribución de la temperatura.
- 10<R<100 Se desarrolla estratificación con separación vertical de las capas superficiales mezcladas por el viento, con una mezcla intensiva, presencia definida de las zonas del embalse,
- >100 Estratificación típica, con parcelas de agua transportadas desde las entradas hacia las zonas más profundas

## **2.3 PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.**

---

<sup>21</sup> Ibid,402.



El tiempo de residencia en un Embalse puede definir diferentes características del cuerpo de agua, con una tasa mayor la temperatura disminuirá y el contenido calórico también disminuirá, la estratificación será menos pronunciada, las tasas de sedimentación bajan<sup>22</sup>. El cambio del calor contenido dentro del sistema se debe a la fuente principal para estos ambientes, el sol, aunque se conocen otras fuentes como son el aire y sedimentos, en donde se tiene en cuenta la profundidad de los cuerpos de agua<sup>23</sup>, como ya se ha mencionado el tiempo de residencia se puede definir por medio del volumen y este a su vez definirá la capacidad productiva, de esta forma se dice que en un embalse que tiene un volumen pequeño tendrá tiempo de vida corto debido a la intensa descarga de sedimentos<sup>24</sup>.

En los embalses las concentraciones de oxígeno disuelto tienden a presentarse en bajas cantidades cuando la temperatura de este aumenta y se evidencia mayor variabilidad horizontal, la cantidad de oxígeno que el cuerpo de agua toma del aire es moderada en comparación a la de los ríos que es alta y la de los lagos que puede ser baja<sup>25</sup>

A continuación, se dará una breve explicación de los parámetros que se trabajaran y analizaran en el embalse La Chapa.

**2.3.1 Conductividad.** Propiedad que poseen las sustancias para conducir la corriente eléctrica. Esta depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia, y temperatura de la medición. En análisis de aguas permite realizar un estimativo rápido de sólidos disueltos en la matriz agua. Unidades  $\mu\text{s}/\text{Cm}$  o  $\text{ms}/\text{Cm}$ , es una medida relativa de su estado trófico y de su contenido de nutrientes y productividad esperable. Los valores hallados en general son bajos y esta puede estar condicionada a la naturaleza de la cuenca respectiva<sup>26</sup>.

**2.3.2 Alcalinidad.** La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases titulables. La alcalinidad es una medida de una propiedad agregada del agua y se puede interpretar en términos de sustancias específicas solo cuando se conoce la composición química de la muestra. Debido a que la alcalinidad de muchas aguas superficiales es primariamente una función del contenido de carbonato, bicarbonato e hidróxido, se toma como un indicador de la concentración de estos

---

<sup>22</sup> ROLDAN G, RAMIREZ J, Op. cit p.127.

<sup>23</sup> WETZEL, Op. cit p. 17.

<sup>24</sup> Ibid, p.34..

<sup>25</sup> Ibid, p.162.

<sup>26</sup> AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION,, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999 541 pages , p.195.

constituyentes. Los valores medidos también pueden incluir contribuciones de boratos, fosfatos, silicatos, u otras bases que estén presentes.<sup>27</sup>

**2.3.3 Potencial de hidrogeno.** El término pH es una forma de expresar la concentración de ión hidrógeno, más exactamente, la actividad del ión hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total. El rango de pH varía entre 0 – 14 unidades: una solución se considera acida si,  $0 < \text{pH} < 7$ , por el contrario, se considera básica, si  $7 < \text{pH} < 14$ , cuando la solución presenta un valor de pH de 7 se considera neutra.

<sup>28</sup>

**2.3.4 Temperatura – calor.** La mayor fuente de calor de los lagos es la radiación solar y la mayoría es absorbida directamente por el agua. Existe cierta transferencia de calor del aire y de los sedimentos en lagos de profundidad moderada. En aguas poco profundas, los sedimentos pueden absorber cantidades significativas de radiación solar, y este calor puede ser transferido en parte al agua. Sin embargo, el calor terrestre es generalmente muy pequeño en comparación con la absorción directa de la radiación solar.

Las entradas y salidas de calor son fenómenos de superficie del sistema. La afluencia solar dominara en las estaciones más cálidas del año, y la estructura térmica vertical se aproximaría entonces al perfil de atenuación de la radiación solar.<sup>29</sup> La radiación solar no solamente determina la calidad y cantidad de luz, sino que también afecta la temperatura del agua. Mientras que en las zonas templadas la temperatura varía ampliamente con el cambio de estaciones, en las zonas tropicales permanece más o menos constante a lo largo del año: siempre fría en las altas montañas y cálida a nivel del mar.

La térmica de los embalses está muy influida por la renovación rápida del agua, la mezcla relativamente intensa a lo largo y alto del embalse tiende a difundir el calor, disminuir el gradiente superficial y disminuir por tanto su perdida en superficie. La termoclina en los embalses suele ser más débil y, a veces más profunda que en lagos comparables. Puesto que los embalses se extienden a lo largo de los valles, suelen estar sometidos a vientos que soplan en sentido longitudinal con un notable efecto de mezcla.

**2.3.5 Color.** El color de un cuerpo lo constituye la luz no absorbida. En el caso del agua hay una gran variedad de colores que va desde el azul hasta el rojo

---

<sup>27</sup> BOJACA, Pilar, PSO DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD POR POTENCIOMETRIA, 2005, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8 paginas, p. 2.

<sup>28</sup> AFANADOR, José, pH EN AGUA POR ELECTROMETRIA, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007, p. 2

<sup>29</sup> ROALDAN y RAMIREZ ,op.cit, p,146.

dependiendo de las sustancias disueltas, como proteínas, grasas, carbohidratos o sustancias derivadas de estas. Un cuerpo de agua con algas verde azules y con presencia de roca calcárea dan un tono verdoso, la presencia de diatomeas y con origen volcánico presentan un color pardo amarillento.

El color aparente del agua se debe al resultado de la acción de la luz sobre el material particulado suspendido junto con otros factores como el tipo de fondo o reflexión del suelo.

La transparencia del agua de los embalses suele ser menor que la de los lagos. Puesto que en estos puede haber más materiales en suspensión que no hacen parte del fitoplancton, la relación entre profundidad de visión del disco de secchi y la concentración de clorofila es más regular en los embalses<sup>30</sup>.

**2.3.6 Oxígeno disuelto (OD).** El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. No obstante, el oxígeno es ligeramente soluble en el agua; la cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución está determinada por: la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmósfera, la temperatura, y la pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos). Las concentraciones de OD en aguas naturales dependen de las características fisicoquímicas y la actividad bioquímica de los organismos en los cuerpos de agua. El análisis del OD es clave en el control de la contaminación en el agua.<sup>31</sup>

**2.3.7 Nitratos.** El nitrógeno se presenta en aguas dulces en numerosas formas: N<sub>2</sub> molecular disuelto; un gran número de compuestos orgánicos de aminoácidos, aminos, proteínas y compuestos húmicos recalcitrantes de bajo contenido de nitrógeno, amoníaco (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrito (NO<sub>2</sub>) y nitrato (NO<sub>3</sub>). Las fuentes de nitrógeno incluyen: precipitación que cae directamente sobre la superficie del lago, fijación de nitrógeno tanto en el agua como en los sedimentos e insumos del drenaje de aguas superficiales y subterráneas. Las pérdidas de nitrógeno se producen por la salida de efluentes de la cuenca, reducción de NO<sub>3</sub> a N<sub>2</sub> por bacterias desnitrificadoras con retorno posterior de N<sub>2</sub> a la atmósfera, y la pérdida permanente de sedimentación de compuestos inorgánicos y orgánicos que contienen nitrógeno a los sedimentos.<sup>32</sup>

---

<sup>30</sup> MARGALEF, Op.cit., p. 791

<sup>31</sup> GAITAN, María, Determinación De Oxígeno Disuelto Por El Método Yodométrico Modificación De Azida, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004, 9 paginas, p. 2

<sup>32</sup> WETZEL, Op.cit., p.205.

La asimilación del nitrato y su reducción por las plantas verdes son procesos claramente dominantes en la zona trofógena de los lagos. Hasta el 60% del  $\text{NO}_3$  puede ser excretado como compuestos orgánicos disueltos de nitrógeno, algunos de los cuales son aminoácidos simples fácilmente utilizados por las bacterias. En los lagos eutróficos, las áreas litorales y las tierras húmedas, la desnitrificación es un proceso importante que influye en la distribución de  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Sin embargo, la asimilación de nitratos puede superar ampliamente las fuentes de ingresos y la generación, en algunos casos, hasta el punto de reducir  $\text{NO}_3\text{-N}$  a concentraciones por debajo de detectables <sup>33</sup>

**2.3.8 Demanda química de oxígeno DQO.** La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo, ampliamente usado para medir el grado de contaminación de las aguas naturales y residuales. <sup>34</sup>

**2.3.9 Fosfatos.** El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales. Actualmente se considera como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, el fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otros poli fosfatos) y fosfatos orgánicos. <sup>35</sup>

**2.3.10 Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO.** Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días a 20 °C. <sup>36</sup>

**2.3.11 Sólidos totales.** Los sólidos son materiales suspendidos y disueltos en el agua. Estos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o al suministro de varias maneras. Las aguas altamente mineralizadas no son adecuadas para muchas aplicaciones industriales o incluso resultan estéticamente insatisfactorias para bañarse. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamientos biológico y físico de aguas. Los sólidos totales se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los

---

<sup>33</sup> Ibid,p.217.

<sup>34</sup> RODRIGUEZ, Carlos, Demanda Química De Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 11 páginas, p.2.

<sup>35</sup> SANABRIA, Doris, Fósforo Total En Agua Por Digestión Ácida, Método Del Ácido Ascórbico, 2004, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 14 páginas, p.3.

<sup>36</sup> NAVARRO, María, Demanda Bioquímica De Oxígeno 5 Días, Incubación Y Electrometría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 13 páginas, p.2.

sólidos totales incluye materias disueltas, sólidos disueltos totales y no disuelto.<sup>37</sup>

**2.3.12 Dureza.** En la práctica se considera que la dureza es causada por iones metálicos divalentes, capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones. Los principales cationes que causan dureza en el agua y los principales aniones asociados con ellos son los siguientes:  $\text{Ca}^{++}$   $\text{HCO}_3^-$   $\text{Mg}^{++}$   $\text{SO}_4^{--}$   $\text{Sr}^{++}$   $\text{Cl}^-$   $\text{Fe}^{++}$   $\text{NO}_3^-$   $\text{Mn}^{++}$   $\text{SiO}_2$ .<sup>38</sup>

**2.3.13 Coliformes totales y fecales.** La presencia de *Escherichia coli* indica contaminación fecal en agua, ya que este microorganismo es habitante normal del tracto digestivo de animales de sangre caliente y rara vez se encuentra en agua o suelo que no haya sufrido algún tipo de contaminación fecal, por ello se considera como indicador universal. Este microorganismo genera una alerta a cualquier sistema de suministro de agua ya que su presencia por sí sola puede generar gastroenteritis y causar la muerte como el caso de la cepa *E. coli* O157:H7 o puede sugerir la presencia de otros microorganismos altamente patógenos como son la *Salmonella*, *Shigella*, *Klebsiella*, *Listeria* etc. La identificación de Coliformes totales es más difícil ya que estos pueden provenir de suelo, y de superficies de agua dulce por lo que no siempre son intestinales. La presencia de Coliformes sugiere fallas en la eficacia del tratamiento y la integridad del sistema de distribución. La identificación de las cepas aisladas puede a veces dar una indicación sobre el origen.<sup>39</sup>

## 2.4 CALIDAD DEL RECURSO HIDRICO

Los anteriores parámetros ayudan a describir la degradación de los sistemas acuáticos, la calidad de agua, que se relacionan con una serie de impactos ambientales, esta calidad puede ser degradada por la presencia de detritos, nutrientes, microorganismos, pesticidas, metales pesados y sedimentos<sup>40</sup>, generalmente la contaminación de un ambiente acuático se encuentra relacionado con la intervención directa o indirecta del hombre, sin embargo muchos de los especialistas en el estudio de los ecosistemas acuáticos se refieren al problema que enfrenta la población humana en la actualidad más

---

<sup>37</sup> CARPIO, Tania, SÓLIDOS TOTALES SECADOS A 103 – 105°C, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8 páginas, p.2.

<sup>38</sup> RODRIGUEZ, Carlos, Dureza Total En Agua Con EDTA Por Volumetría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 12 páginas, p.2.

<sup>39</sup> NAVARRO, María, Determinación De *Escherichia coli* Y Coliformes Totales En Agua Por El Método De Filtración Por Membrana En Agar Chromocult, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8 páginas, p.2. 17 páginas, p.2.

<sup>40</sup> NASCIMENTO, R. F. F.; ALCÂNTARA, E.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Caracterização limnológica do reservatório hidrelétrico de Itumbiara, Goiás, Brasil. *Amby-Água*, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 143-156, 2011.

como un problema de manejo que de un problema de escases o estrés<sup>41</sup>, para Smlyody & Varis, la gravedad y la complejidad de la crisis del agua, nacen de problemas reales de disponibilidad y aumento de la demanda.

La evaluación de la calidad de agua es una tarea importante que solo puede ser realizada con un conocimiento profundo de los procesos limnológicos.

Es alta la complejidad de determinar los factores que intervienen en la calidad de agua, debido a la gran cantidad y aspectos físicos de variables que se utilizan para describir el estado de los sistemas, esto tomando como referencia la definición de calidad de agua como, una lista de concentraciones, especificaciones de sustancias orgánicas e inorgánicas<sup>42</sup>, debido a esta complejidad se opta por el uso de una expresión matemática que considere los aspectos fisicoquímicos, biológicos y aspectos externos como los cambios temporales y espaciales, estas expresiones matemáticas llamadas índices de calidad de agua, los cuales han sido optado para tener una expresión integrada.

Los índices de calidad de agua pueden ser usados para:

- Manejo de recurso: pueden proveer información importante a tomadores de decisiones.
- Clasificación de áreas: Para comparar el estado del recurso en diferentes áreas protegidas
- Aplicación de normatividad: Permite verificar los niveles permitidos máximos de calidad de agua.
- Análisis temporal

## **2.5 ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA**

**2.5.1 Índice NSF 1989.** El índice de calidad de agua NSF ICA NSF, es soportado por la National Sanitation Foundation (NSF), Brown et al. En 1970 reunieron un panel de 142 personas en todo el territorio de EE. UU. con experiencia conocida en la gestión de la calidad del agua. Tres cuestionarios fueron enviados por correo a cada panelista. En primer lugar, se les pidió a los panelistas considerar 35 parámetros para su posible inclusión en un ICA y agregar cualquier otro parámetro que sintieran que debería incluirse. A los panelistas también se les pidió que calificaran los parámetros que incluirían en

---

<sup>41</sup>TUNDISI, J. G, Recursos hídricos no futuro:problemas e soluções, estudos avançados 22 (63), 2008

<sup>42</sup> Op.cit, Sierra, p,47.

una escala de 1, (la mayor importancia), a 5 (la menor importancia). Los resultados de la primera encuesta se incluyeron con el segundo cuestionario y se pidió a los panelistas que revisaran su respuesta original. El objetivo del segundo cuestionario fue obtener un consenso más cercano sobre la importancia de cada parámetro. En el tercer cuestionario, se pidió a los panelistas que dibujaran una curva de calificación para cada uno de los nueve parámetros en los gráficos en blanco provistos.

Los niveles de calidad del agua (ICA) de 0 a 100 se indicaron en el eje y de cada gráfico, mientras que los niveles crecientes del parámetro particular se indicaron en el eje x. Cada panelista trazó una curva que sintieron que representaba mejor la variación en calidad de agua producida por los distintos niveles de cada parámetro<sup>43</sup>.

En 1970 Brown promedió todas las curvas para producir una sola línea para cada parámetro. El análisis estadístico de las calificaciones permitió asignar pesos a cada parámetro, donde la suma de los pesos es igual a 1. Los nueve parámetros y sus pesos correspondientes se enumeran en la Tabla 1. El valor de calidad de agua para cada parámetro luego se calculó como el producto del valor de la curva de calificación.

La ecuación que define este índice es:

$$INSF = \sum_{i=1}^9 SI_i * Wi$$

Donde:

SI: Es el valor que se toma de las curvas creadas para cada valor del parámetro medido.

Wi: Es el peso para cada parámetro que se presenta en el anexo 1.

**2.5.2 Índice Dinus.** El Índice de calidad del agua DINIUS definido en 1987 se creó para evaluar el nivel de contaminación en agua dulce. Se realizó una ecuación de Delphi de cuatro vueltas, utilizando un panel de siete científicos acuáticos reconocidos a nivel nacional, para determinar los contaminantes que se incluirán en el índice, la relación entre la cantidad de estos contaminantes en el agua y la calidad resultante del agua, y la importancia de cada variable de contaminación para cada uso del agua, así como para la contaminación

---

<sup>43</sup> WILLS, Martin, application of the national sanitation foundation water quality index in the cazenovia creek, ny, pilot watershed management Project, Middle States Geographer, 1996:95

general. Se utilizó un índice multiplicativo para juntar los contaminantes en un solo sistema<sup>44</sup>.

Este índice se aplica basándose en la siguiente formula.

$$IWQ = \pi_{i=1}^n * l_i^{w_i}$$

Donde:

li: se obtiene aplicando las ecuaciones para cada parámetro

Wi: el peso para cada parámetro, los cuales se definen en el anexo B.

## 2.6 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA CON RESPECTO A SU USO

Se entiende por criterio de calidad de agua una determinada concentración de un parámetro que se espera pueda dar al cuerpo de agua un determinado uso benéfico

Tabla 3. Usos potenciales del recurso hídrico, criterios de calidad

Uso potencial	Definición	Criterios de calidad
<b>Asimilación de desechos</b>	Utilización de un cuerpo de agua para recibir, transportar, asimilar los desechos producidos por las actividades humanas, autopurificación.	No se requieren criterios de calidad, ya que cualquier cuerpo de agua puede ser utilizado para similar desechos.
<b>Navegación</b>	Utilización de los cuerpos de agua para transporte con propósitos comerciales o industriales.	Este uso depende principalmente del, caudal, la profundidad, la velocidad y la sección transversal, no existen valores de concentraciones o parámetros que inhiban la navegación.
<b>Paisajístico</b>	Calidad estética del agua, en cuanto lo que se puede percibir y	Se puede ver afectada por, materiales flotantes, solidos suspendidos, lodo, plantas

<sup>44</sup>DINIUS, S.H, Desing of an index of water quality, water resources bulletin american water resources association, Vol 23, No. 5, octubre 1987, p,1.



<b>Uso potencial</b>	<b>Definición</b>	<b>Criterios de calidad</b>
	altere la apariencia y la armonía dentro del paisaje	acuáticas, turbiedad, grasas, olor, basuras, O <sub>2</sub> >2 mg/L DBO <sub>5</sub> <30mg/L
<b>Generación hidroeléctrica</b>	Uso de cuerpos de agua para la generación de energía	Salinidad pH ST, SST
<b>Irrigación o riego</b>	Uso del recurso hídrico sobre cultivos, en este caso los criterios no deben basarse únicamente en los efectos sobre plantas, animales y humanos sino también sobre el suelo.	pH Coliformes Nutrientes
<b>Abastecimiento de agua municipal</b>	Uso del recurso hídrico para consumo y uso doméstico. La calidad del recurso en este caso estará enmarcada según la legislación para fuente abastecedora, (agua cruda y para consumo (agua tratada)	Microorganismos patógenos Coliformes Huevos de helmintos Arsénico Bario Cadmio Cromo Plomo Selenio Plata Sales (SD, cloruros, sulfatos) Olor, sabor, color
<b>Hábitat para peces</b>	Definir los criterios de calidad de agua para el hábitat de formas de vida acuática es complejo debido a la variedad de formas de vida acuática que pueden adaptarse a diferentes condiciones ambientales	Mercurio Cadmio, cobre, hierro(metales) Coliformes Patógenos Alcalinidad Arsénico, bario, cadmio, cromo, cloro residual Oxígeno>4mg/L DBO <sub>5</sub>
<b>Recreación</b>	Incluye actividades como pesca, canotaje, con contacto	pH coliformes Oxígeno disuelto<70%

Uso potencial	Definición	Criterios de calidad
	secundario y actividades como natación, buceo, de contacto primario.	Tensoactivos Grasas Sustancias toxicas Nutrientes Temperatura

Fuente: Sierra, 2011

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

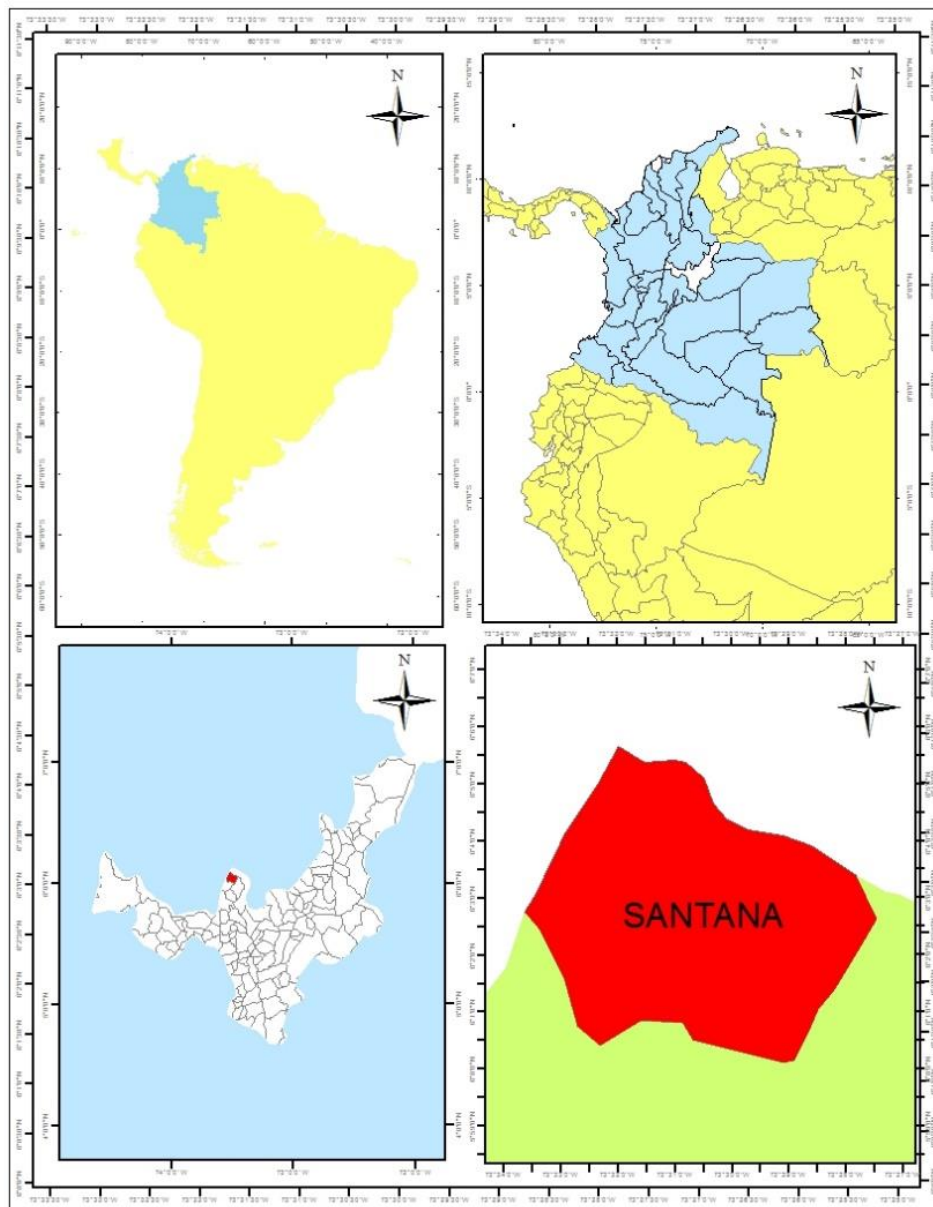
**3.1.1 Generalidades.** El municipio de Santana se ubica entre puntos de latitud 1°155.000 y 1°168.000 metros Norte y de longitud 1°060.000 y 1°070.000 metros Este, con respecto a las coordenadas con origen en Bogotá Colombia. El área total municipal es de 6.954,56 Hectáreas de las cuales 23,93 Hectáreas corresponden a la zona urbana. El municipio ocupa el extremo norte de la provincia Ricaurte de Boyacá, en límites con el departamento de Santander y está distanciado unos 95 Km. de la capital del departamento de Boyacá, Tunja, por la vía de Arcabuco y Moniquirá, denominada troncal del norte.

El embalse La chapa se encuentra al sur oriente del municipio de santana en la vereda San Pedro, hace parte de la cuenca del río Suarez de la sub cuenca de la quebrada el Mohán, la cual presenta 3 efluentes, entre ellos la quebrada la chapa que tiene un área de 4,726 km<sup>2</sup> la cual recibe el termino de unidad de área basándose en su extensión (< 5 km<sup>2</sup>)<sup>45</sup> y es la fuente principal de suministro del recurso hídrico al embalse La Chapa. El embalse cuenta con un área máxima de 4270 m<sup>2</sup> y un volumen máximo de 15500 m<sup>3</sup>. el embalse sirve de abastecimiento a un acueducto comunitario rural y en tiempo de sequía suministra al sector urbano, el flujo del embalse se encuentra regulado por una entrada natural mediante un tubo de 6", salida natural por el rebosadero por dos tubos de 6 y 12", salida por bombeo por un tubo de 4" y salida para abastecimiento del acueducto rural de dos mangueras de 1", a continuación se muestra la localización del municipio, donde se encuentra el sistema acuático estudiado, desde un nivel continental. Imagen 1.

---

<sup>45</sup> JIMENEZ, H, HIDROLOGIA BASICA, 1986, Universidad del valle, Facultad de ingeniería, Departamento de mecánica de fluidos, 2 da edición, p, 13.

Imagen 1. Localización del municipio de Santana – embalse La chapa



Fuente: Autor

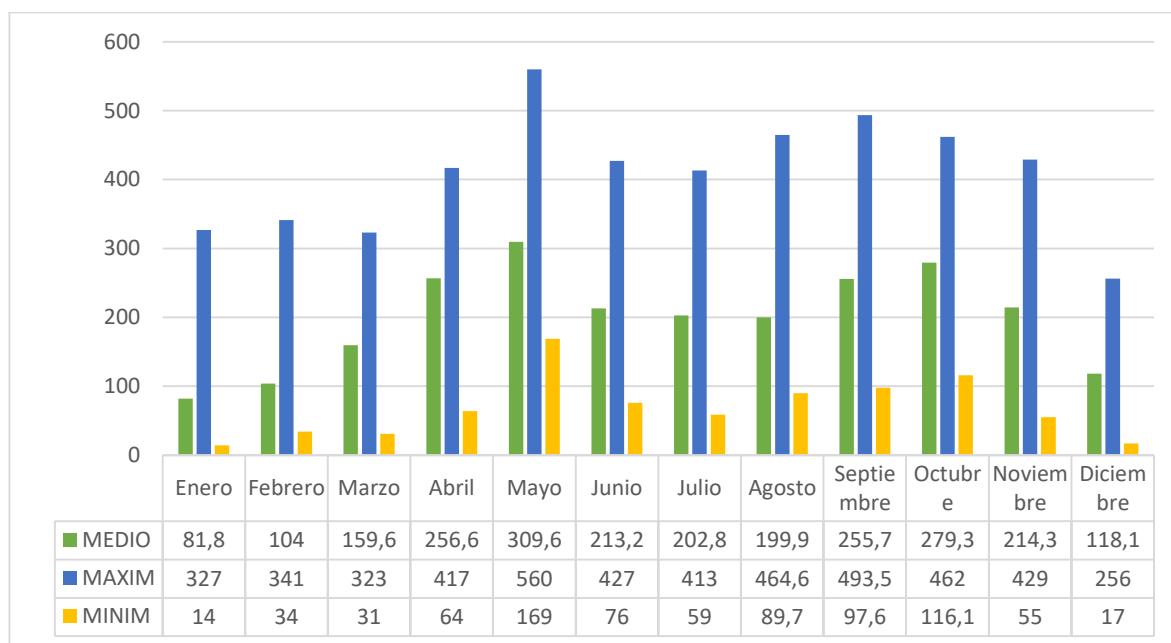
**3.1.2 Climatología.** En cuanto a las condiciones macro climáticas, el municipio se caracteriza por tener un clima de condiciones isotérmicas, es decir de mínimas variaciones en la temperatura a través del año y en la permanencia de las lluvias. El régimen anual de lluvias, el brillo solar y la humedad relativa son de tipo bimodal. El municipio se encuentra localizado en el área de influencia de la zona de confluencia intertropical y el estar rodeada de cadenas montañosas que detienen los vientos, han producido unas condiciones

climáticas semi-húmedas que se caracterizan por ser muy constantes y con pocas variaciones dentro del año.<sup>46</sup>

La precipitación media anual, tomando como base la estación La Cómoda ubicada en el municipio de Santana en la coordenada: 6°N y 73°43'E, es de 1 998,96 mm; con un régimen de tendencia bimodal, es decir que presenta dos picos máximos bien definidos durante el año en los meses de mayo y octubre. Los meses de menor precipitación son diciembre y enero en el primer semestre y agosto en el segundo; Sin embargo, el déficit de agua es más acentuado en el período seco del primer semestre con oscilaciones grandes en las medias, que en general se ubican por debajo de 100mm.

A continuación, se muestra un análisis temporal de la estación COMODA LA en el periodo de 1960 hasta 2016, donde se confirma la información recogida en el EOT de Santana.

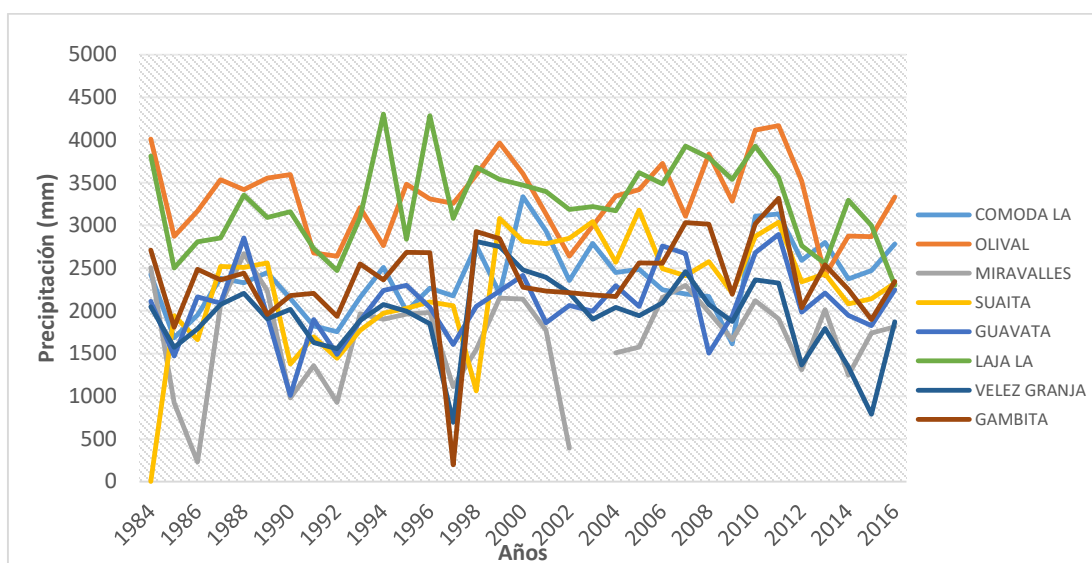
Grafica 1. Precipitación mensual estación Comoda La 1960 – 2016



Fuente: IDEAM – Autor

<sup>46</sup> Ministerio Del Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, 2006, Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Santana – Boyacá, 140 páginas, p.27.

Gráfica 2. Precipitación media multianual de las estaciones seleccionadas para el estudio.



Fuente: IDEAM - Autor

En el EOT del municipio se realizó un análisis climatológico basándose en los datos recogidos de la estación ubicada en el Municipio de Moniquirá, en un periodo de 20 años las cuales son presentadas a continuación.

Tabla 4. Datos climatológicos de la estación Moniquirá en un periodo de 20 años

<b>Precipitación</b>	<b>1900,8mm</b>
Días lluviosos	221
Humedad relativa	78%
Evaporación	627mm
Brillo Solar año	1976 horas
Brillo solar diario	5,41 horas
Temperatura media	5,41 horas
Temperatura máxima absoluta	20°C
Temperatura mínima absoluta	8,8°C

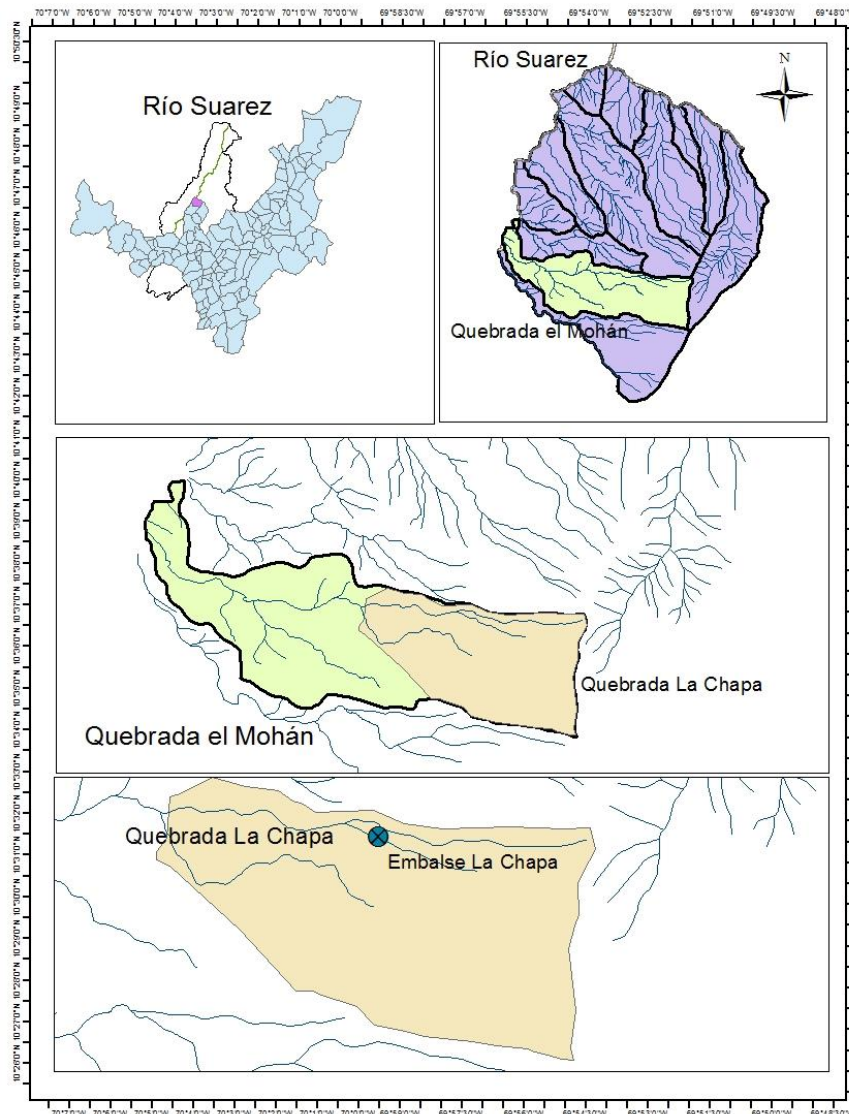
Fuente: EOT Santana – Boyacá

**3.1.3 Hidrografía.** El sistema hidrográfico del municipio de Santana, está conformado por una red de drenaje que forma parte de la Cuenca del Río Magdalena. Su principal corriente hídrica es el río Suárez en la parte nor-occidental, que recibe directamente las aguas del río Lenguaruco en la vertiente Oriental del municipio y de las quebradas El Mohán, El Salitre, Sancute en su vertiente occidental. El río Lenguaruco recibe las aguas de las quebradas Gualí y Frenos entre otras.

Forma parte también del componente hídrico del municipio, los pozos La Chapa, Las Tetas y Los Burros.

Para ilustrar un poco el sistema hidrográfico del municipio, se ha optado por clasificar las cuencas de mayor a menor importancia por orden, tomando como primer orden la Cuenca del Río Suárez y posteriormente sus afluentes.<sup>47</sup> A continuación se muestra la localización del sistema hídrico al cual pertenece el embalse La Chapa, desde una escala de cuenca, departamento, municipio, micro cuenca, unidad de cuenca, Imagen 2.

Imagen 2. Delimitación cuenca abastecedora embalse La Chapa.



Fuente: Memorias EOT Santana – Boyacá – Autor

<sup>47</sup> Ibid.p.29.

### **3.1.2 Recopilación de información Climatológica utilizada para el estudio.**

La información utilizada en el estudio se recopiló de estaciones meteorológicas e hidroclimáticas que se obtuvo mediante el servicio de información del Instituto de estudios ambientales IDEAM, ver imagen 3.

El análisis de la información se realizó en un periodo de 35 años, este basándose en el mayor porcentaje de datos disponibles y en el periodo mínimo para realizar este tipo de análisis, 20 años, a partir de esta información se analizó Precipitación, temperatura, evaporación, información que ayudara a definir los fenómenos naturales de entrada y salida.

En la región la información recogida corresponde a las estaciones meteorológicas: Comoda la, Olival, Miravalles, Suaita, Guavata, Laja la, Velez granja, Gambita, los estudios corresponden al periodo 1981 a 2016.

La información recopilada de las estaciones anteriormente descritas evidencio una variación gradual con respecto a la precipitación, lo que se tomó como base para la definición de medición por periodos climáticos.

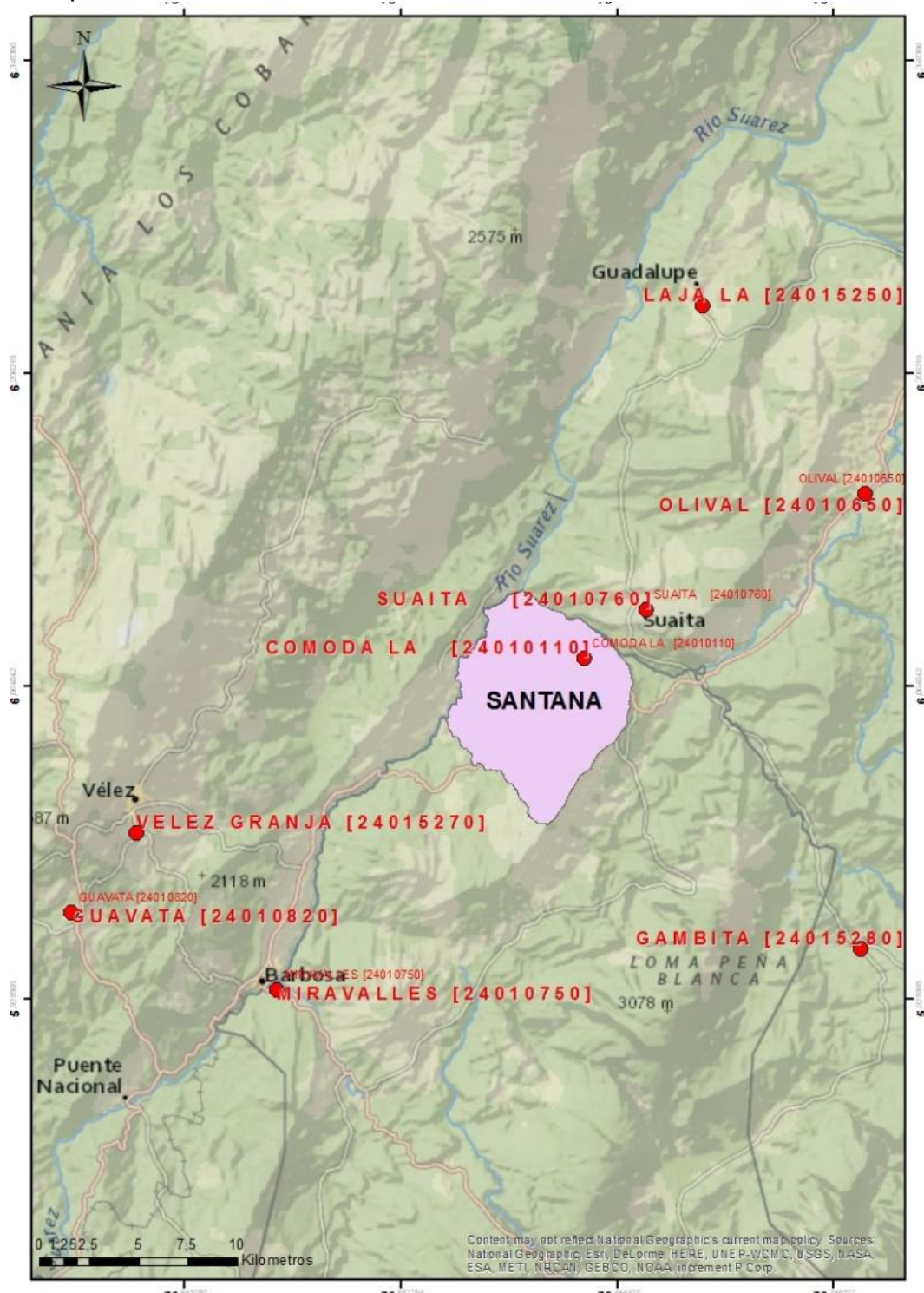


Tabla 5. Información de estaciones utilizadas en el estudio

CODIGO CAT.	NOMBRE	TIPO	CLASE	CATEG.	ESTADO	CORRIENTE	DEPTO	MPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA INST.
24010110	COMODA LA [24010110]	CON	MET	PM	ACT	LENGUARUCO	BOYACÁ	SANTANA	6,0769444	-73,46917	1.520	15/02/1954
24010650	OLIVAL [24010650]	CON	MET	PM	ACT	TOLOTA	SANTANDER	SUAITA	6,1513889	-73,34167	1.502	15/11/1973
24010750	MIRAVALLS [24010750]	CON	MET	PM	ACT	MONQUIRA	BOYACÁ	MONQUIRÁ	5,9258333	-73,60917	1.730	15/02/1974
24010760	SUAITA [24010760]	CON	MET	PM	ACT	LENGUARUCO	SANTANDER	SUAITA	6,099	-73,44139	1.660	15/03/1958
24010820	GUAVATA [24010820]	CON	MET	PM	ACT	EL NIDO	SANTANDER	GUAVATÁ	5,9613889	-73,7025	2.018	15/08/1980
24015250	LAJA LA [24015250]	CON	MET	CO	ACT	SUAREZ	SANTANDER	GUADALUPE	6,2371667	-73,41539	1.400	15/11/1973
24015270	VELEZ GRANJA [24015270]	CON	MET	CO	ACT	QDA PALENQUE	SANTANDER	VÉLEZ	5,9972222	-73,67278	2.170	15/03/1974
24015280	GAMBITA [24015280]	CON	MET	CO	ACT	LENGUARUCO	SANTANDER	GÁMBITA	5,9447222	-73,34361	1.900	15/05/1974

Fuente: IDEAM – Autor

Imagen 3. ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio, ubicación municipio de santana.



Fuente: IDEAM, National Geographic, Autor

### 3.2 MEDICIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

La medición del tiempo de residencia es un proceso complejo en el cual debe tenerse en cuenta el funcionamiento del sistema, las características físicas y los procesos externos que interviene en este.

Para establecer el tiempo de residencia del embalse se utilizó la siguiente ecuación en donde se toma la relación volumen caudal<sup>48</sup>

$$R = \frac{V}{Q} (\text{Días})$$

Donde:

R: Tiempo de residencia

V: Volumen del embalse en el momento

Q: Diferencia de caudal en el embalse.(m<sup>3</sup>/s, hora, día, mes)

Para determinar la forma y el volumen del embalse se realizó la batimetría de este, se definió el perímetro del embalse para los diferentes muestreos y se utilizó una mira para evidenciar el cambio de nivel y así poder determinar los volúmenes correspondientes, que van a estar integrados por fenómenos climáticos de la región.

**3.2.1 Batimetría.** La batimetría como método clásico consiste en crear una nube de puntos, distribuida de forma geométrica intentando conformar trazados rectos y paralelos entre sí, en forma de “malla”. En donde se debe tener en cuenta la obtención del valor h como el de las coordenadas planas (x, y)<sup>49</sup>.

Para conocer la forma del embalse se hizo el reconocimiento en campo del embalse, utilizando GPS y ecosonda se recogieron datos de profundidad y de coordenadas cada 4 m.

Para realizar un análisis de lo que pasa en el embalse en cuanto a las fluctuaciones del volumen se realizó el esquema de balance hídrico donde se determinó las entradas y salidas de este.

**3.2.2 Balance hídrico en el embalse la chapa.** Para analizar el comportamiento de un sistema acuático es necesario considerar un conjunto de entradas y salidas naturales del mismo las cuales hacen parte del balance hídrico del embalse, los cambios presentes en esta región se regulan por dos

---

<sup>48</sup> RUEDA, Op.cit p.13.

<sup>49</sup> CHAPAPRÍA, V, et al, Levantamientos y seguimientos topo-batimétricos en ingeniería de costas, 1995, Ingeniería del Agua. Vol. 2, Universidad politécnica de valencia, p,183.

épocas de lluvias y dos épocas de sequía definidas, de igual manera se considera la extracción controlada del agua.

El balance hídrico se hizo con periodos mensuales para conocer como las variaciones estacionales inciden en el cambio del tiempo de residencia.

Dicho balance se encuentra conformado por fenómenos naturales de

Precipitación

Evapotranspiración

Escorrentía

**3.2.3 Estimación de la precipitación en el área de estudio.** Para la determinación de la precipitación se usó la información del promedio mensual de cada año medido de precipitación de todas las estaciones seleccionadas, se utilizó dichos valores y la ubicación de las estaciones meteorológicas para generar un mapa de isoyetas para cada mes, utilizando el software ARCGIS, en donde se interpola la información y se obtuvo la precipitación dentro del área del embalse.

**3.2.4 Estimación de la evaporación en el área de estudio.** Los valores de evaporación tomados para el análisis de balance hídrico dentro del embalse La Chapa provienen de la estación Velez granja, se utilizó únicamente esta información ya que era la única con los datos disponibles en el área de estudio

**3.2.5 Estimación de la escorrentía de la quebrada La Chapa hacia el embalse.** La escorrentía se realizó basándose en el método U.S. SOIL CONSERVATION (SCS) del departamento de agricultura de Estados Unidos, el cual se fundamenta en consideraciones teóricas basadas en más de 1000 cuencas, donde se utilizan datos del área de la cuenca, precipitación mensual y tipos de suelos, que se toman de las tablas que propone el método para diferentes usos y tipos de suelo, los valores de curvas que definen las características del suelo fueron tomados de (Lavao y Corredor de 2013<sup>50</sup> y de Nicolás et al de 2010<sup>51</sup>).

Se utiliza la siguiente ecuación

$$Pe = \frac{(p-Ia)^2}{p-Ia+S} \quad Ia = 0,2S \quad S = \frac{25400}{CN} - 254$$

<sup>50</sup> LAVAO, S, & CORREDOR, J, Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. caso de estudio: cuenca del río Murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica, Universidad Militar Nueva Granada, 2014.

<sup>51</sup> FRANCISCO-NICOLAS, Néstor et al. Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. Terra Latinoam [online]. 2010, vol.28, n.1, pp.71-78.

Donde:

Pe: Precipitación efectiva esorrentía

P: Precipitación

Ia: Abstracción o perdida inicial

S: capacidad máxima de infiltración

CN: Número de curva (0-100)

**3.2.6 Fenómenos controlados, entradas y salidas.** Las entradas y salidas del embalse están divididas según la naturaleza de su ejecución, es decir que, aunque es un sistema artificial posee variaciones en entrada y salida que pueden definirse como naturales, las cuales corresponden a la entrada desde la quebrada La Chapa, fuente abastecedora del embalse, entrada que se encuentra regulada por una rejilla por donde el agua es encausada hacia el embalse por una tubería de 6 pulgadas (ver anexo 4) y la salida que corresponde al rebosadero del embalse el cual comienza a funcionar a partir de una altura de lámina de agua y corresponde a dos tubos de 6 y 12 pulgadas. Las salidas en el embalse que son controladas por el fontanero y por el presidente del acueducto comunitario corresponden a la extracción por bombeo en una tubería de 4 pulgadas y la salida hacia al acueducto comunitario rural que corresponde a 2 tuberías de 1 pulgada.

Los métodos de medición del caudal para cada una de las entradas y salidas variaron según sus características.

La medición en de la entrada de la quebrada se realiza basándose en mediciones de las dimensiones de la rejilla y velocidad de entrada, se aplican las siguientes ecuaciones<sup>52</sup>.

$$E = \left[ \frac{b}{b+s} \right] * 100 \quad AT = \frac{Au}{E} \quad Q = V * Au$$

Donde:

- E (%): Eficiencia
- b (m): Espaciamiento entre barras
- s (m): diámetro de barra
- AT (m<sup>2</sup>): área total
- Au(m<sup>2</sup>): área útil
- Q (m<sup>3</sup>/s): caudal

---

<sup>52</sup> MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Ras – 2000, Sección II, Título E, Bogotá, 2000, p.58.

- $V(m/s)$ : Velocidad

Para la salida por el rebosadero y las mangueras del acueducto comunitario rural se mide el caudal directamente por método volumétrico, esta medición se realizó en cada salida de campo al embalse, se decide tomar un único valor de caudal en cada periodo ya que una medición más extensa implicaría un periodo de campo más largo el cual no está contemplado en el desarrollo del proyecto.

El caudal que es bombeado se determina por la cantidad de volumen bombeado diariamente, de acuerdo a datos suministrados por el operador.

### **3.3 MÉTODO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS LIMNOLÓGICOS Y FÍSICO QUÍMICOS**

La metodología de medición de parámetros físicos y químicos se presenta en datos determinados en campo y datos de laboratorio.

#### **3.3.1 Parámetros medidos en campo.**

**- Medición de perfiles de saturación de oxígeno y temperatura.** Los perfiles de oxígeno y temperatura se realizaron en el embalse la chapa desde las salidas de reconocimiento de campo, para identificar el comportamiento del embalse y tener información necesaria para la metodología de las posteriores mediciones.

Los perfiles se realizaron cada 50 cm y se determinaron las horas más productivas las cuales puedan presentar cambios en el transcurso del día dentro del sistema. Para la medición de estos parámetros se escogió la zona donde se presenta la profundidad máxima y donde no hay conexión con el litoral, esta zona es definida como Limnética, dicha zona presenta la misma localización horizontal en cada muestreo, pero presentaba una variación vertical (profundidad) dependiente del tipo de evento climático del momento.

La medición de estos parámetros se realizó con el oxímetro que cuenta con una sonda de 15 m, del cual se obtuvo valores de oxígeno disuelto, saturación de oxígeno y temperatura

**3.3.2 Medición de parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua en el embalse La chapa.** La medición de los parámetros para aplicar los índices NSF 1984 Y DINIUS se realizó en los meses febrero, marzo, abril y mayo.

En cada salida a campo se tomó muestras de agua para el análisis Limnológico y de calidad de agua en función de su uso, de los siguientes parámetros físicos

y químicos teniendo en cuenta las guías de muestreo del libro Standart Methods 2012: Profundidad Secchi, Temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, saturación de Oxígeno, Nutrientes ( $\text{NO}_3$ , fosfatos) DBO, SST, Color, Dureza, Cloruros, Alcalinidad Total coliformes totales y coliformes fecales.

**3.3.3 Localización de puntos de muestreos de los parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua.** Para la localización de los puntos de muestreo de los parámetros evaluados dentro de los índices se tiene en cuenta que en cuerpos de agua lenticos se presentan mayor variación espacial que temporal y según la literatura debe escogerse puntos dentro del embalse cercanos a la presa, en la mitad del cuerpo y en la cola.<sup>53</sup> Debido a que este embalse no presenta presa se tomaran los puntos de muestreo basándose en su profundidad máxima, entradas, salidas y punto central del embalse,<sup>54</sup> donde se realizará un muestreo integral en cinco puntos del embalse, como se muestra en la imagen 5.

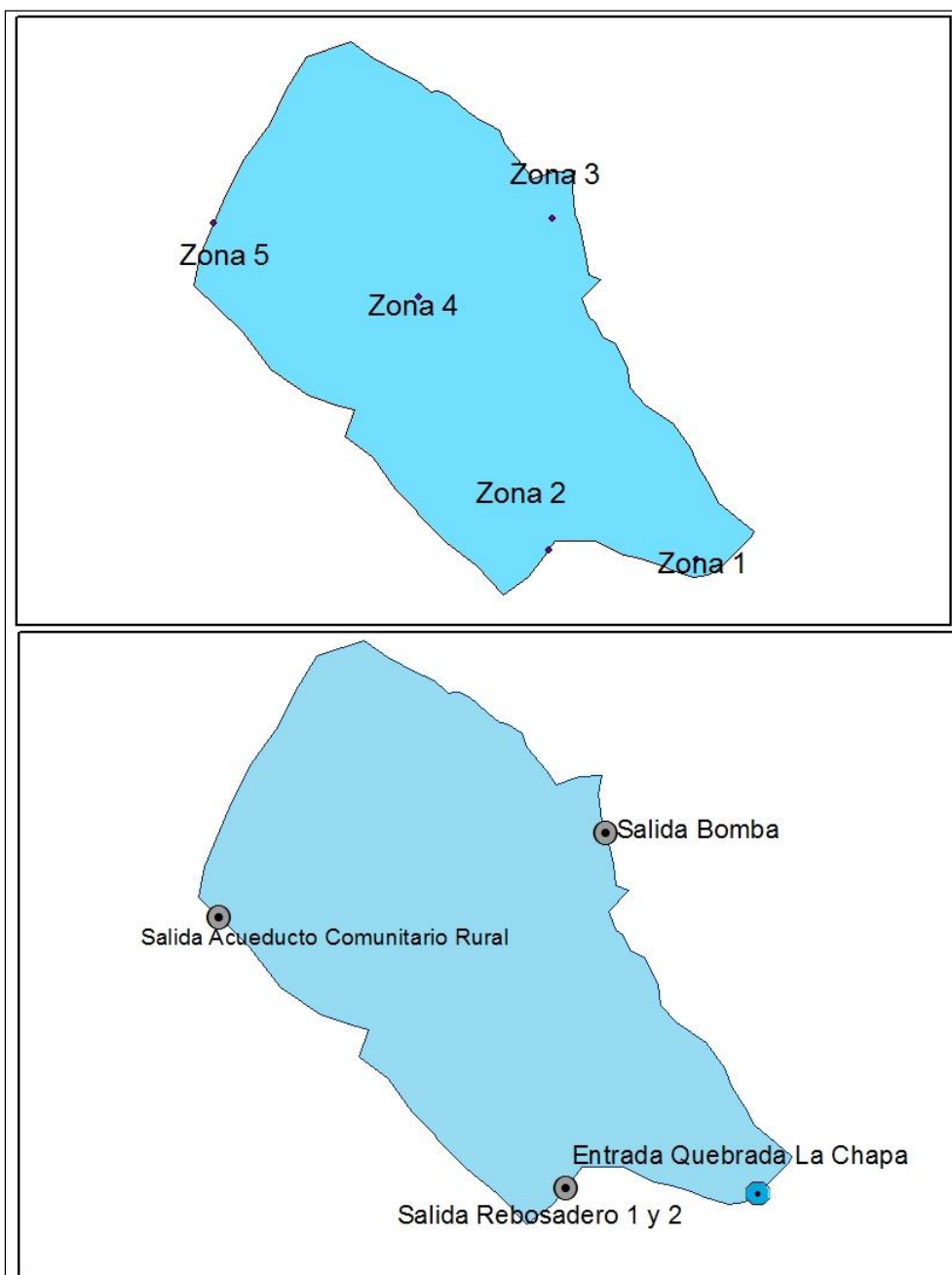
En cada punto muestreado y según la profundidad Secchi y profundidad máxima, se tomaron muestras por punto donde se ve representada la zona fótica y la superficie, 200 ml Para un volumen total de 2 L las cuales se preservarán en una nevera a 4°C y se transportarán al laboratorio para su posterior análisis.

Imagen 4. Puntos de muestreo para el Índice de Calidad

---

<sup>53</sup> MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2003, Seguimiento de la calidad de las aguas en embalses de zonas sensibles, Documento de síntesis, Gobierno de España, 96 páginas, p.5.

<sup>54</sup> FRAILE, Henar, et al, 2008, Seguimiento de la calidad de un embalse de abastecimiento de agua potable según las directrices de la Directiva Marco (embalse del Anarbe. Cuenca Norte), Revista Limnética, 27 (2): 211-226 páginas, p.213, Asociación Ibérica de Limnología, Madrid. España. ISSN: 0213-8409



Fuente: Autor

**3.3.4 Medición de parámetros para la aplicación de índices de calidad de agua en la quebrada La chapa.** Para la aplicación de los índices de calidad de agua y análisis de los parámetros físico químicos dentro de la quebrada La Chapa, se utilizó un muestreo instantáneo<sup>55</sup>, que describa lo que está pasando en el momento en la quebrada La Chapa.

<sup>55</sup> SIERRA, op.cit, p,219.



**3.3.5 Metodología de evaluación de parámetros físico químicos en el laboratorio.** La medición de parámetros físico químicos se realizó en el laboratorio de ingeniería ambiental bajo la metodología planteada en el libro STANDART METHODS 2012, siguiendo las unidades que se proponen en la aplicación de los índices NSF 1984 Y DINIUS.

Tabla 6. Método utilizado en el laboratorio

<b>Metodología parámetros medidos en laboratorio</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
Oxígeno Disuelto	SM-4500-OC oxímetro
Nitratos	SM-4500-NO <sub>3</sub> –B espectrofotómetro
Fosfatos	SM-4500 PC ácido ascórbico
Dureza	SM-2340 C EDTA titulométrico
Alcalinidad	SM-2320 B titulométrico
DQO	SM-5220 D Colorimétrico
DBO	SM.5210 B 5 día prueba DBO
Cloruros	SM-4500-CL-B argentométrico
Solidos totales	SM-2540 B
Color	SM-2120 C espectrofotómetro
Turbidez	SM- 2130 B
pH	SM-4500 HB
Coliformes totales	SM-9221 B
Coliformes fecales	SM-9221E

Fuente: Standart Methods – Autor

### **3.3.6 Relación de los parámetros físico químicos en el embalse La Chapa.**

Para determinar la relación multivariada de los factores físicos y químicos dentro del embalse la chapa, para cada momento hidrológico se aplica el análisis de componentes principales ACP, utilizando el software PAST 3. Ese análisis incluye los parámetros pH, temperatura, profundidad secchi, % saturación de oxígeno, conductividad, color, alcalinidad, solidos totales, dureza, cloruros, nitratos, fosfatos, DQO, DBO, coliformes totales y coliformes fecales.

## **3.7 ESTADO TRÓFICO**

El estado trófico se basa en el contenido de nutrientes del agua y el consecuente potencial productivo, existen varias formas de determinar el estado trófico para sistemas tropicales, en esta investigación se usan los parámetros de profundidad secchi y fosfatos, índices estimados por Carlson

para embalses tropicales en Brasil, e implementados por Márquez<sup>56</sup>. los cuales están definidos por las siguientes formulas

$$IET(SD) = 10 \left[ 6 - \frac{0,64 + \ln(SD)}{\ln 2} \right]$$

$$IET(PO_4 - P) = 10 \left[ 6 - \frac{\ln(21,67/(PO_4 - P))}{\ln 2} \right]^{57}$$

### 3.8 APLICACIÓN DE LOS INDICES DE CALIDAD DE AGUA EN EL EMBALSE LA CHAPA.

Con los datos de los parámetros medidos se procede a aplicar los índices de calidad de agua propuestos.

#### 3.8.1 INSF 1978

Fórmula utilizada para la aplicación del índice<sup>58</sup>.

$$INSF = \sum_{i=1}^9 SI_i * Wi$$

Donde

SI: Subíndice del parámetro I

Wi: Peso ponderado del subíndice para cada parámetro.

Para aplicar este índice se le asignan valores ponderados (w) para cada uno de los parámetros según el anexo 1.

Los valores de I se toman de las gráficas (ver anexo 4) para cada parámetro, las cuales fueron creadas por el panel de científicos que participo en la creación del índice. Para confirmar los resultados obtenidos se utilizaron las

<sup>56</sup> MARQUEZ, op.cit, p,141.

<sup>57</sup> HENAO, A, et al, EL DISCO SECCHI Y EL ESTADO TROFICO, 1987, p, 67.

<sup>58</sup> WILLS, Op.cit p. 5.

páginas de network of wáter quality<sup>59</sup> y wáter research center<sup>60</sup>, donde se calcula automáticamente la calidad de agua basándose en el índice NSF 1984.

### 3.8.2 DINIUS

Para aplicar este índice se le asignan valores ponderados para cada una de las variables<sup>61</sup>

$$IWQ = \pi_{i=1}^n * l_i^{wi}$$

Donde:

W: Peso ponderado para el subíndice

I: Subíndice de la variable

La ecuación donde se muestran los valores ponderados y el subíndice para cada variable se muestra en el anexo 2.

---

<sup>59</sup>LUTZ, Donna, Calculating NSF Water Quality Index, [http://home.eng.iastate.edu/~dslutz/dmrwqn/water\\_quality\\_index\\_calc.htm](http://home.eng.iastate.edu/~dslutz/dmrwqn/water_quality_index_calc.htm), 2011, visitado el 20/03/2018

<sup>60</sup> ORAM, Brian, Monitoring the Quality of Surface Waters, wáter research wáter, <https://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>, 2014, visitado el 20/03/2018

<sup>61</sup> DINIUS, Op.cit p. 3.

## 4. RESULTADOS

Los resultados de tiempo de residencia, características físico químicas, así como la aplicación de los índices de calidad de agua se presentan por momento hidrológico, el cual se relaciona con los eventos climáticos de la región así: semi seco, seco, semi húmedo y húmedo, dichos eventos climáticos regulan el nivel, el volumen y los flujos de caudal dentro del embalse, tabla 7.

Tabla 7. Descripción momentos hidrológicos

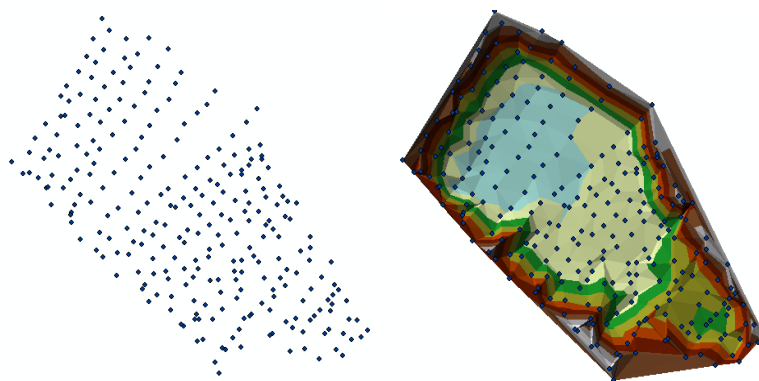
Evento climático	Fecha	Momento Hidrológico
Transición a seco	Diciembre – febrero	Transición alto – bajo
Seco	Febrero – Marzo	Bajo
Transición a húmedo	Marzo – Abril	Transición bajo - alto
Húmedo	Abril - Mayo	Alto

Fuente: Autor

### 4.1 BATIMETRÍA Y ESTIMACIÓN DE VOLUMEN

Basándose en los puntos georreferenciados y medidos con ecosonda se crearon los siguientes mapas utilizando el software ArcGis, donde se evidencia la forma y diferentes profundidades dentro del embalse.

Imagen 6. puntos georreferenciados dentro del embalse, mapa raster, curvas de nivel

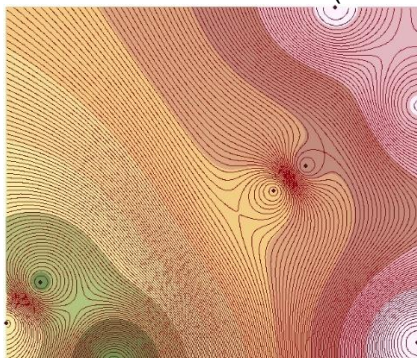


Fuente: Autor

A partir de este método se definió el volumen para cada periodo, dependiendo del nivel medido.



Imagen 9. Isoyetas dentro del área de estudio (febrero).

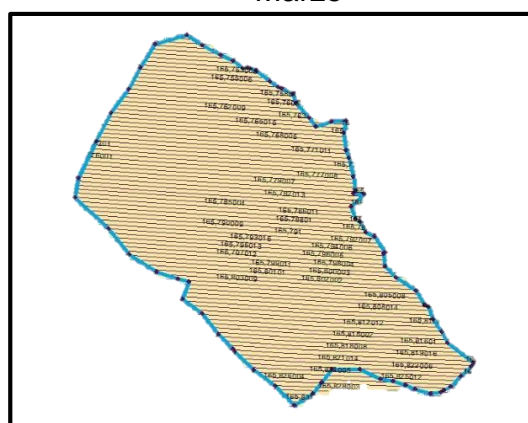
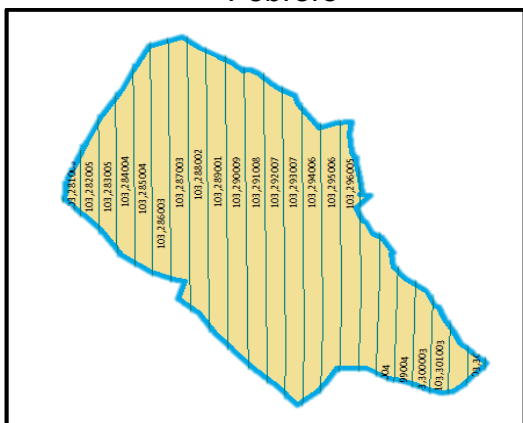


Fuente: Autor

Imagen 10 y 11. Isoyetas de precipitación para febrero y marzo.

Febbrero

Marzo

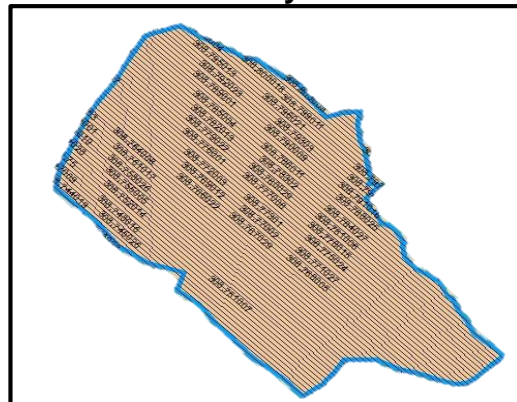
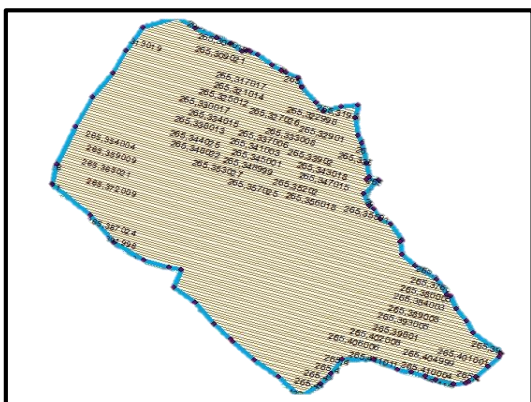


Fuente: Autor

Imagen 12 y 13. Isoyetas en el área del embalse abril y mayo

## Abril

## Mayo



Fuente: Autor

Tabla 9. Precipitación media mensual en el área del embalse

<b>Mes</b>	<b>Precipitación (mm)</b>
<b>Enero</b>	84,86
<b>Febrero</b>	103,29
<b>Marzo</b>	165,78
<b>Abril</b>	265,36
<b>Mayo</b>	308,77
<b>Junio</b>	214,56
<b>Julio</b>	200,18
<b>Agosto</b>	201,70
<b>Septiembre</b>	248,81
<b>Octubre</b>	291,43
<b>Noviembre</b>	222,47
<b>Diciembre</b>	123,85

Fuente: Autor

Los valores de precipitación muestran un periodo mayor de lluvias en los dos semestres del año, los mayores valores se presentan en el mes de mayo y en el mes de octubre y se evidencia un descenso progresivo, hasta un aumento progresivo en el siguiente semestre.

**4.2.2 Evaporación potencial en el área del embalse.** Los valores de evaporación corresponden a la información obtenida por la estación Velez granja, debido a que es la única estación presente en el área de estudio que cuenta con este parámetro, los valores utilizados corresponden a la evaporación media.

Tabla 10. Evaporación media mensual

<b>Mes</b>	<b>Evaporación media (mm)</b>
<b>enero</b>	93,8
<b>febrero</b>	89
<b>marzo</b>	96,2
<b>abril</b>	87,1
<b>mayo</b>	87,7
<b>junio</b>	87,7
<b>julio</b>	98,4
<b>agosto</b>	100,8
<b>septiembre</b>	95,2
<b>octubre</b>	88,2
<b>noviembre</b>	81,2
<b>diciembre</b>	92,1

Fuente: IDEAM – Autor

La evaporación no presenta un comportamiento de ascenso y descenso progresivo, sin embargo, los mayores valores son relacionados con los periodos de menor precipitación.

**4.2.3 Escorrentía.** La escorrentía que se produce en la quebrada la chapa, aportando caudal en la entrada del embalse se determinó por el método SCS, descrito en la metodología.

Tabla 11. Resultados escorrentía método SCS

Unidad de cuenca	Descripción	% A	TS	CN	AxCN	CNIII	S	Ia
1	Bosques	1	D	91	91	95,87	10,92	2,18

Fuente: Autor

Tabla 12. Escorrentía mensual

Mes	Escorrentía (mm)
Enero	111,65
Febrero	73,03
Marzo	91,24
Abril	153,36
Mayo	252,69
Junio	296,04
Julio	201,99
Agosto	187,64
Septiembre	189,16
Octubre	236,17
Noviembre	278,72
Diciembre	209,88

Fuente: Autor

El comportamiento de la escorrentía mensual se relaciona con los valores obtenidos del volumen dentro del embalse.

**4.2.4 Fenómenos controlados entradas y salidas.** La entrada de caudal proveniente de la quebrada se presenta en el momento transición bajo – alto y en el momento alto, en los momentos bajo y transición a bajo la lámina de agua no alcanza la suficiente altura para generar caudal positivo al embalse.



Tabla 13. Caudal entrada quebrada La Chapa

Entrada Quebrada							
Momento Hidrológico	V m/s	S /m)	b(m)	AT(m2)	Au(m2)	E%	Q(m3/s)
Transición bajo- alto	0,0456746	0,035	0,026	0,407	0,173471	0,42622	0,00792322
Alto	0,88324	0,035	0,026	0,407	0,173471	0,42622	0,15321653

Fuente: Autor

Tabla 14. Salidas embalse La Chapa

Salidas	Q (M3/S)
Rebosadero 1	0,002888087
Rebosadero 2	0,007692308
Manguera veredal 1	7,0241x10 <sub>-4</sub>
Manguera veredal 2	7,0241x10 <sub>-4</sub>
Bomba	1,20573x10.3

Fuente: Autor

Los valores de manquera veredal 1 y 2 y la extracción por bombeo fueron constantes en el muestreo, la salida del rebosadero se presenta únicamente en un momento hidrológico (alto)

#### 4.3 BALANCE HIDRICO Y TIEMPOS DE RESIDENCIA EN EL EMBALSE LA CHAPA POR MOMENTOS HIDROLOGICOS.

Tabla 15. Balance hídrico momentos hidrológicos embalse La Chapa

M H	PRECIPITACIÓN (m³/mes)	EVAPORACIÓN (m³/mes)	Escorrentía (m³/mes)	ET (m³/mes)	SR1 (m³/mes)	SR2 (m³/mes)	SB (m³/mes)
M A-B	0,103	0,068	0,011	0	0	0	3229,43
M B	0,165	0,068	0,011	0	0	0	3229,43
M B-A	0,265	0,067	0,011	20537		0	3229,43
M A	0,308	0,068	0,011	410375	20603,1	7735,454	0

M H	MR1 (m³/mes)	MR2 (m³/mes)	Volumen (m³/mes)	Entradas (m³/mes)	Salidas (m³/mes)	Q TR (m³/mes)	TR (Meses)	TR (Días)
M A-B	1881,353	1881,353	11099,951	0,115	6992,209	3496,162	3,174	<b>44,450</b>
M B	1881,353	1881,353	7576,1048	0,177	6992,21	3496,194	2,166	<b>33,589</b>
M B-A	1881,353	1881,353	9047,5298	20537,26	6992,209	6992,209	1,293	<b>38,818</b>
M A	1881,353	1881,353	15218,543	410375,5	32101,3	221238,4	0,068	<b>1,253</b>

Fuente: Autor

Donde:

ET: Entrada quebrada La Chapa

SR1: Salida rebosadero 1

SR2: Salida rebosadero 2

SB: Salida bomba

MR1: Manguera rural 1

MR2: Manguera rural 2

Q: Caudal

TR: Tiempo de residencia

Los resultados del tiempo de residencia en la anterior tabla, describen la influencia de los eventos climatológicos dentro del comportamiento del embalse, los eventos de mayor precipitación y escorrentía, y menor evaporación corresponden al tiempo de residencia más bajo (momento hidrológico alto) donde se presenta flujos de entradas y salidas mayores, que en los otros momentos.

Se evidencia una mayor relación de las variaciones del volumen con respecto a la precipitación y se define una relación inversamente proporcional de entradas y salidas con el tiempo de residencia.

En el momento hidrológico de transición alto - bajo se presenta un volumen medio de 11099,9 m<sup>3</sup> iniciando febrero, con respecto a los demás volúmenes medidos, y con el valor estimado para finales de diciembre que corresponde a 14500 m<sup>3</sup>, este valor se ve influenciado por disminuciones en la precipitación en el mes de enero siendo este el mes deficitario del año, sin entradas y salidas naturales, presenta un flujo bajo con un volumen alto, lo que describe que en este periodo se presente un tiempo de residencia de 44 días (mayor en el estudio).

Para el momento hidrológico Bajo, se presenta una disminución en el nivel y volumen 7576 m<sup>3</sup> del embalse, lo que se relaciona con la disminución de precipitación. Los valores colectados de entradas y salidas naturales del embalse que corresponden a la quebrada y el rebosadero, se definen por la medición hecha el día del muestreo, es decir que se trabaja con un único valor representativo del momento. El comportamiento en este momento hidrológico se presenta como, menor flujo y menor volumen lo que describe la disminución del tiempo de residencia, 33 días, con respecto al momento hidrológico anterior.

En el momento hidrológico de transición bajo – alto, se presenta un aumento de volumen, ya que este hace referencia a inicios del mes de abril, donde se evidencia la ocurrencia de fenómenos de precipitación y la entrada de caudal proveniente de la quebrada, aunque los valores son bajos, se presenta un incremento de volumen, condición que afecta directamente al tiempo de residencia, presentándose un valor de (38 días).

El momento hidrológico alto, comienza en el mes de abril, mes de mayor precipitación en el primer semestre del año, lo que se ve reflejado en el

aumento de los caudales de entrada y por esto de los de salida. El momento hidrológico alto, alcanza el nivel y volumen máximo en el embalse, que se regula a través de la descarga natural de caudal a través del rebosadero y la entrada natural de la quebrada, para este momento, el acueducto urbano de Santana, deja de extraer agua del embalse, debido al aumento de oferta en la fuente principal de abastecimiento, sin embargo, la extracción el acueducto comunitario rural permanece, este momento es muy importante ya que presenta una variación de caudal elevada, lo que permite que el volumen elevado que se presenta tenga un tiempo de residencia corto de 2 días.

#### **4.4 RESULTADOS DE CARACTERÍSTICAS LIMNOLOGICAS, FÍSICO – QUÍMICAS.**

**4.4.1 Características Generales quebrada La Chapa.** A continuación, se presenta los resultados de los parámetros medidos en la quebrada la chapa, fuente de abastecimiento del embalse La Chapa, información que se utilizara para realizar una posible comparación con los parámetros evaluados durante el proyecto. Esta información corresponde al memento hidrológico de transición bajo – alto, basándose en que presenta características de almacenamiento y flujo, y por limitaciones del proyecto. Sin embargo, para un análisis más detallado por momento se recomienda hacer un muestreo de la quebrada para cada uno de estos en particular

Tabla 16. Características generales Quebrada La chapa. Momento transición bajo – alto.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Coliformes totales NMP/100ml	33
Coliformes fecales NMP/100ml	23
pH	8,01
DBO mg/L DBO	0,8
Nitratos mg/L NO <sub>3</sub>	0,5
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	0,3
Temperatura °C	20,6
Turbiedad UNT	0,49
Solidos totales mg/L ST	166,5
Conductividad us/cm	372,1
Color	55,5
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	334,303
Cloruros mg/L Cl <sup>-</sup>	5,99814

Parámetros	Valor
Alcalinidad mg/L	190
% Sat de oxígeno	47,6
DQO	1,03

Fuente: Autor

La quebrada La Chapa evidencia valores muy altos para los parámetros conductividad, sólidos totales, dureza y alcalinidad, relacionados con los que se presentan en agua cruda<sup>62</sup>, estos parámetros están relacionados con una menor dilución de aguas, debido a bajas precipitaciones en el área<sup>63</sup>, otra característica de este comportamiento puede ser los procesos erosivos en la cuenca que se caracterizan como ligeros en aumento<sup>64</sup> en el área de la quebrada La chapa.

**4.4.2 Quebrada La Chapa Índice NSF 1984.** Resultados del índice NSF 1984, para la quebrada La Chapa en el momento hidrológico transición bajo – alto.

Tabla 17. Resultado índice NSF 1984

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor Si	Si*Wi
Coliformes Fecales	23	0,15	62	9,3
pH	8,01	0,12	84	10,08
DBO	0,8	0,1	96	9,6
Nitratos	0,5	0,1	97	9,7
Fosfatos	0,3	0,1	81	8,1
Temperatura	20,6	0,1	89	8,9
Turbiedad	0,49	0,08	98	7,84
Sólidos totales	166,5	0,08	77	6,16
% Sat Oxígeno	47,6	0,17	40	6,8
<b>Σ Si*Wi</b>				<b>76,48</b>

Fuente: Autor

**4.4.3 Descripción.** El índice de calidad NSF muestra para la quebrada La Chapa, una descripción de agua de calidad buena entre un rango de 71 – 90, debido a un porcentaje de saturación de oxígeno bajo y la presencia de coliformes fecales, debe tenerse en cuenta que el parámetro de % de saturación de oxígeno presenta el peso ponderado más alto lo cual afecta al resultado en general.

<sup>62</sup> SIERRA, op.cit, p,48.

<sup>63</sup> MARQUEZ Y GUILLOT, op,cit,p,59.

<sup>64</sup> CORPOBOYACA, Formulación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Suarez, mapa de erosión, diciembre, 2011.

#### 4.4.4 El índice de calidad de agua NSF muestra un rango de calidad

- **Quebrada La Chapa Índice DINIUS.** Resultados del índice DINIUS, para la quebrada La Chapa en el momento hidrológico transición bajo – alto.

Tabla 18. Resultado índice Dinius

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $I_i^{Wi}$
Coliformes totales	33	1,49168764
Coliformes fecales	23	1,63916159
pH	8,01	1,39435632
DBO	0,8	1,58681596
Nitratos	0,5	1,57067271
Temperatura	20,6	1,36795345
Conductividad	372,1	1,40057436
Color	55,5	1,27712045
Dureza	334,303	1,26291351
Cloruros	5,99814	1,48520224
Alcalinidad	9500	1,24445065
% Sat Oxígeno	47,6	1,53038206
Producto de $I_i^{Wi}$		<b>74,273</b>

Fuente: Autor

**4.4.5 Descripción.** El índice de calidad DINIUS muestra para la quebrada La Chapa, una descripción de agua de calidad regular entre un rango de 51 – 80, debido a que este índice trabaja con mayor cantidad de parámetros lo cual representa mayor sensibilidad un rango de calidad de agua más elevado, dicho resultado se debe a la presencia de coliformes fecales, el cual cuenta con el peso ponderado más alto.

#### 4.5 RESULTADOS PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS EN EL EMBALSE

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los parámetros medidos con respecto a las muestras de agua recolectadas en cada muestreo del embalse la chapa, los resultados de describirán por los momentos hidrológicos pre definidos.

##### 4.5.1 Momento Hidrológico: Transición de alto – bajo

##### 4.5.2 Condiciones generales del sistema

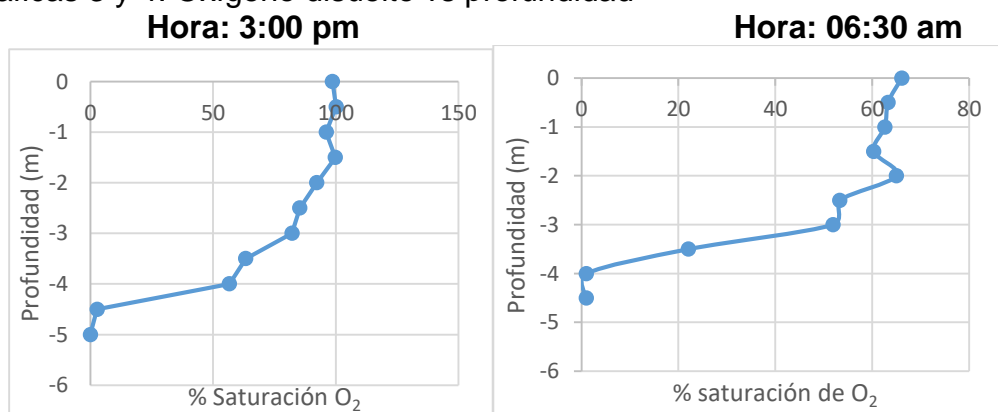
Tabla 19. Condiciones generales del sistema Febrero

Parámetros	Valor
Coliformes totales NMP/100ml	1600 NMP
Coliformes fecales NMP/100ml	1600 NMP
pH	7,11
DBO mg/L DBO	8,35
Nitratos mg/L NO <sub>3</sub>	0,5
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	0,04
Temperatura °C	22
Turbiedad UNT	7,16
Solidos totales mg/L	190
Conductividad us/cm	199,1
Color	96
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	104,09464
Cloruros mg/L Cl <sup>-</sup>	2,99907
Alcalinidad mg/L	126
% Sat de oxígeno	75
Profundidad secchi	1,62

Fuente: Autor

**4.5.3 Comportamiento de oxígeno disuelto y temperatura en el embalse La Chapa.** A continuación, se muestra las gráficas del contenido de oxígeno y temperatura a diferentes profundidades.

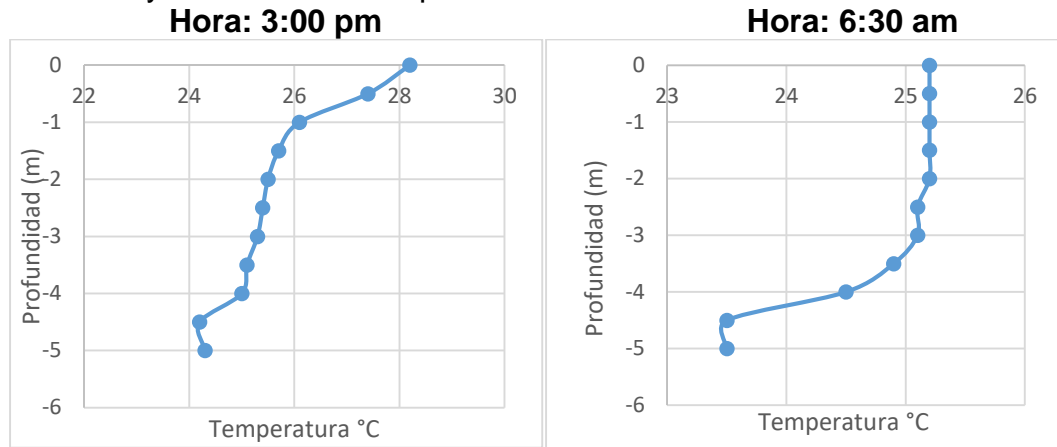
Graficas 3 y 4. Oxígeno disuelto vs profundidad



Fuente: Autor

**4.5.4 Descripción.** Los perfiles de oxígeno para este momento, presentan una disminución progresiva de 100% en el epilimnion a 0%, en el hipolimnion, lo que describe una zona anaeróbica.

Gráficas 5 y 6. Perfiles de temperatura



Fuente: Autor

- **Descripción.** El perfil de temperatura de las 3:00 pm muestra una diferencia entre el epilimnion y metalimnion<sup>65</sup> de 2 °C y del epilimnion al hipolimnion de 4°C, lo que indica una estratificación térmica y una alta resistencia térmica relativa<sup>66</sup> que se debe a la diferencia de densidades entre estas dos temperaturas.

Sin embargo, se evidencia en el perfil de las 6:30 am una ruptura de la diferencia de temperatura del epilimnion y el metalimnion, presentando la diferencia de temperatura de 2°C del epilimnion al hipolimnion.

#### 4.5.6 Índice NSF 1984

Tabla 21. Resultado índice NSF 1984

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor SI	Si*Wi
Coliformes Fecales	1600	0,15	20	3
pH	7,11	0,12	91	10,92
DBO	8,35	0,1	41	4,1
Nitratos	0,5	0,1	97	9,7
Fosfatos	0,04	0,1	98	9,8
Temperatura	22	0,1	81	8,1
Turbiedad	7,16	0,08	82	6,56

<sup>65</sup> SIERRA, E, Eutrofización de embalse, descripción, prevención y manejo, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2010, p,27

<sup>66</sup> ESTEVES & BARBIERI, Fundamentos de limnología, a radiação solar e seus efeitos em ecossistemas aquáticos continentais, p,157.

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor SI	Si*Wi
Sólidos totales	190	0,08	74	5,92
% Sat Oxígeno	75	0,17	81	13,77
$\Sigma Si*Wi$				<b>71,87</b>

Fuente: Autor

- **Descripción.** El índice de calidad NSF muestra para el embalse La Chapa, una descripción de agua de calidad buena entre un rango de 71 – 90 cercano al límite, debido a la presencia de coliformes fecales y sólidos totales.

#### 4.5.7 Índice DINIUS

Tabla 22. Resultado índice Dinius

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $li^{Wi}$
Coliformes totales	1600	1,42337437
Coliformes fecales	1600	1,53864241
pH	7,11	1,44454358
DBO	8,35	1,46556299
Nitratos	0,5	1,57067271
Temperatura	22	1,31525875
Conductividad	199,1	1,42370058
Color	96	1,26660916
Dureza	104,09464	1,30527069
Cloruros	2,99907	1,51195102
Alcalinidad	126	1,29077322
% Sat Oxígeno	75	1,59400131
<b>Producto de <math>li^{Wi}</math></b>		<b>70,1337546</b>

Fuente: Autor

- **Descripción.** El índice de calidad DINIUS describe al embalse La Chapa, con una calidad de agua entre el rango definido como regular 51 – 80, debido a que este índice trabaja con mayor cantidad de parámetros lo cual representa mayor sensibilidad un rango de calidad de agua más elevado, dicho resultado se debe a la presencia de coliformes fecales y mayores concentraciones de nitratos.



#### 4.5.8 Momento Hidrológico: Bajo

##### - Características generales

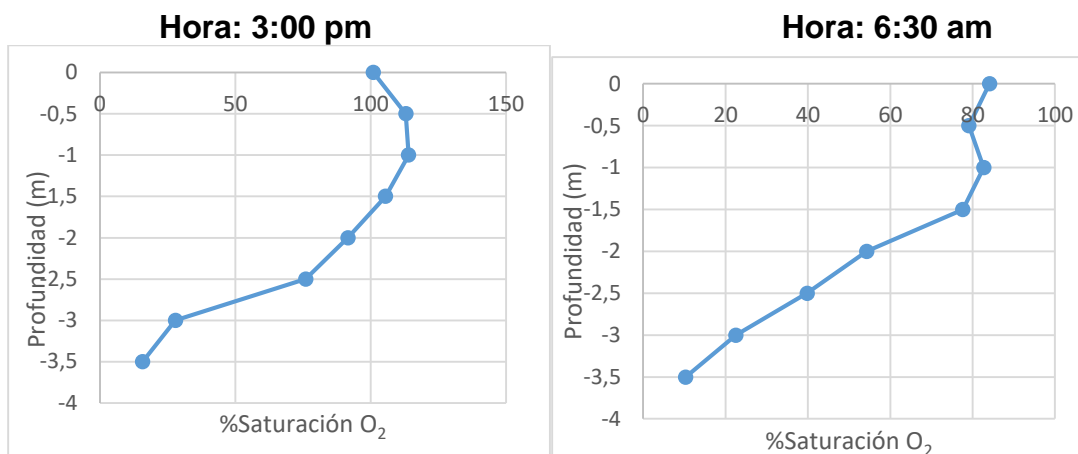
Tabla 23. Características generales

Parámetros	Valor
Coliformes totales NMP/100ml	1600
Coliformes fecales NMP/100ml	1600
pH	7,15
DBO mg/L DBO	2,1
Nitratos mg/L NO <sub>3</sub>	0,4
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	0,03
Temperatura °C	16,9
Turbiedad UNT	7,165
Solidos totales mg/L ST	135,5435
Conductividad us/cm	227
Color	145
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	124,11284
Cloruros mg/L Cl <sup>-</sup>	12,99597
Alcalinidad mg/L	103
% Sat de oxígeno	73
Profundidad Secchi (m)	1

Fuente: Autor

- **Comportamiento de oxígeno disuelto y temperatura en el embalse La Chapa.** A continuación, se muestra las gráficas del contenido de oxígeno y temperatura a diferentes profundidades

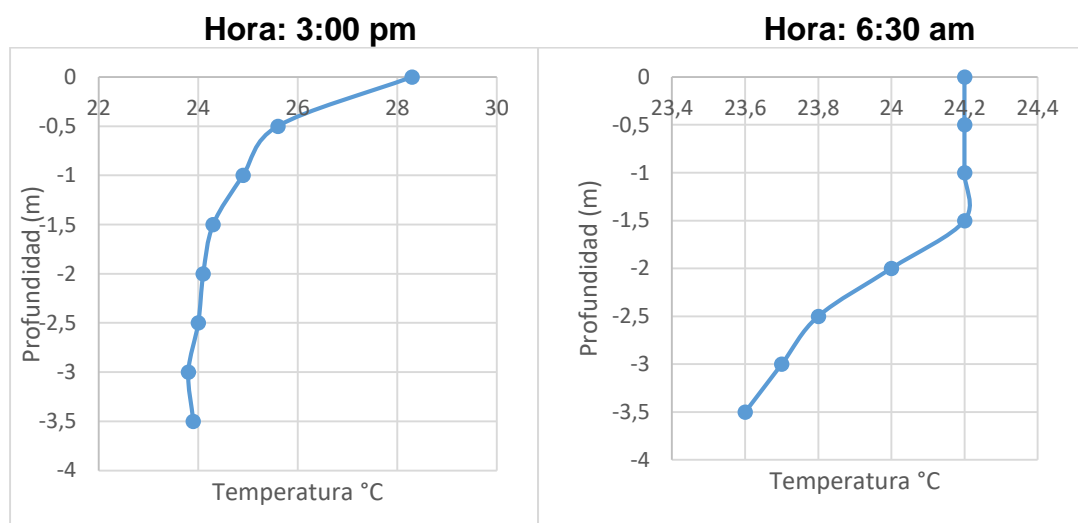
## Gráficas 7 y 8. Perfiles de oxígeno



Fuente: Autor

- **Descripción.** En este momento hidrológico, se presenta una profundidad máxima de 3,5 metros, se evidencia una disminución gradual del oxígeno con la profundidad, en los dos perfiles, sin embargo, se muestra, una mayor pendiente en el perfil de las 06:00 am.

## Gráficas 9 y 10. Perfiles de temperatura



**Descripción.** En el perfil de las 3:00 pm se observa una disminución gradual de temperatura con una pendiente más pronunciada en los 0,5 m, entre la superficie o epilimnion y el metalimnion se presenta una diferencia de 2°C, mientras que con el hipolimnion una diferencia de 4 grados.

En el perfil de la 6:30 am se observa una mezcla de la superficie hasta los 1,5 m de profundidad, proceso que puede definirse como una ruptura de la

estratificación, lo que se evidencia con la diferencia de 1°C entre el epilimnion e hipolimnion.

#### 4.5.9 Índice NSF 1984

Tabla 23. Resultado índice NSF 1984

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor Si	Si*Wi
Coliformes Fecales	1600	0,15	20	3
pH	7,15	0,12	88	10,56
DBO	2,1	0,1	80	8
Nitratos	0,4	0,1	97	9,7
Fosfatos	0,03	0,1	100	10
Temperatura	16,9	0,1	81	8,1
Turbiedad	7,165	0,08	82	6,56
Solidos totales	135,5435	0,08	80	6,4
% Sat Oxígeno	73	0,17	79	13,43
$\Sigma Si*Wi$				<b>75,3</b>

Fuente: Autor

- **Descripción.** El índice de calidad NSF muestra para el embalse La Chapa, una descripción de agua de calidad buena entre un rango de 71 – 90, presenta un comportamiento particular al anterior momento hidrológico (transición alto – bajo) debido a la presencia de coliformes fecales, sin embargo, presenta un mayor valor debido a la menor presencia de solidos totales.

#### - Índice DINIUS

Tabla 24. Resultado índice Dinius

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $i_i^{Wi}$
Coliformes totales	1600	1,42337437
Coliformes fecales	1600	1,53864241
pH	7,15	1,44227515
DBO	2,1	1,5357535
Nitratos	0,4	1,57926972
Temperatura	16,9	1,25350843
Conductividad	227	1,41881937
Color	145	1,2587557
Dureza	124,11284	1,29879543
Cloruros	12,99597	1,45592257
Alcalinidad	103	1,29297464

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $I_i^{Wi}$
% Sat Oxígeno	73	1,59000638
Producto de $I_i^{Wi}$		<b>66,672</b>

Fuente: Autor

**Descripción.** El índice de calidad DINIUS describe al embalse La Chapa, con una calidad de agua entre el rango definido como regular 51 – 80, este momento hidrológico presenta el rango más bajo de todos los medidos, debido a que presenta valores elevados en las concentraciones de coliformes totales y fecales haciéndolo un momento de mayor importancia en el estudio, se presentan valores elevados de alcalinidad.

#### 4.5.9 Momento hidrológico: Transición bajo – alto

##### - Características generales

Tabla 23. Características generales

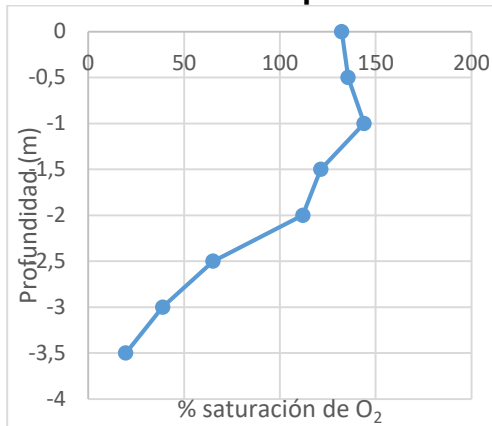
Parámetros	Valor
Coliformes totales NMP/100ml	54
Coliformes fecales NMP/100ml	>1600
pH	8,3
DBO mg/L DBO	0,85
Nitratos mg/L $NO_3$	0,86
Fosfatos mg/L $PO_4$	0,19
Temperatura °C	22,,8
Turbiedad UNT	7,88
Solidos totales mg/L ST	93,5
Conductividad us/cm	85,2
Color	168,6
Dureza mg/L $CaCO_3$	172,15652
Cloruros mg/L $Cl^-$	5,99814
Alcalinidad mg/L	106
% Sat de oxígeno	55,4
Profundidad Secchi	0,75

Fuente: Autor

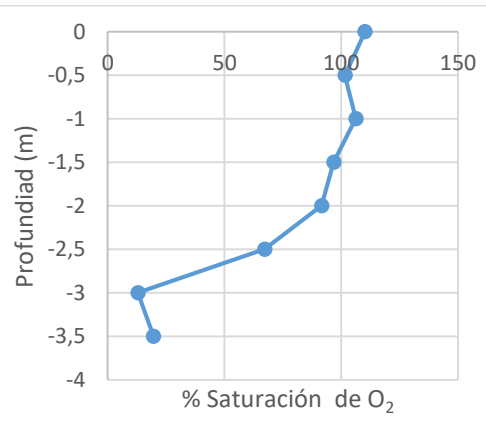
**- Comportamiento de oxígeno disuelto y temperatura en el embalse La Chapa.** A continuación, se muestra las gráficas del contenido de oxígeno y temperatura a diferentes profundidades

Gráficas 11 y 12. Perfiles de oxígeno

**Hora: 3:00 pm**



**Hora: 6:30 am**

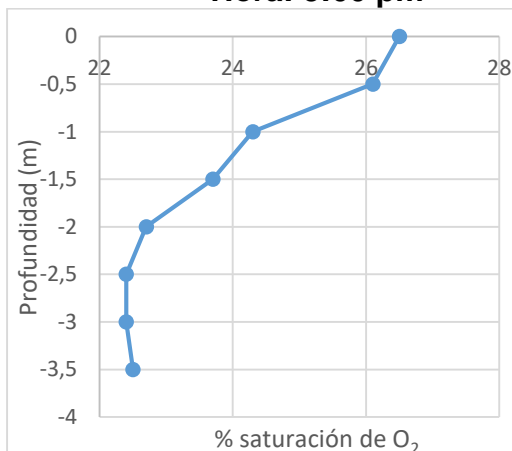


Fuente: Autor

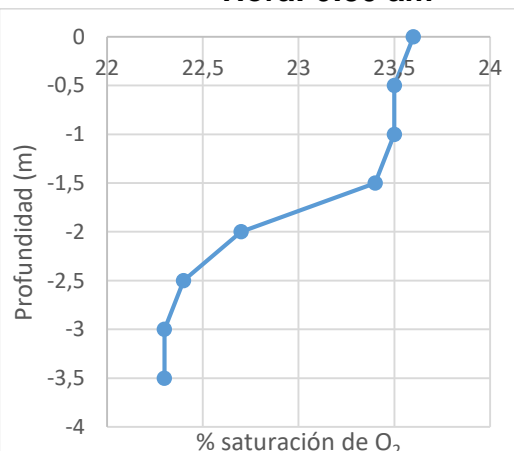
- **Descripción.** En este momento se presenta una mayor concentración de oxígeno, en el perfil de las 3:00 pm, sin embargo, presenta una pendiente más marcada lo que se relaciona con unos cambios grandes de oxígeno en cambios pequeños de profundidad.

Gráficas 13 y 14. Perfiles de temperatura

**Hora: 3:00 pm**



**Hora: 6:30 am**



Fuente: Autor

- **Descripción.** Para el perfil de las 3:00 pm se observa una diferencia entre el epilimnion y el hipolimnion de 4°C, lo que corresponde al comportamiento evidenciado en los anteriores momentos, sin embargo, en este momento se presenta una disminución más gradual con una pendiente menos inclinada.

El perfil de las 6:30 am muestra el comportamiento ya marcado, de tendencia a la mezcla hasta los 1,5 m y una variación de 1°C hacia el fondo.

## - Índice NSF 1984

Tabla 25. Resultado índice NSF 1984

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor SI	Si*Wi
Coliformes Fecales	1600	0,15	20	3
pH	8,3	0,12	73	8,76
DBO	0,85	0,1	96	9,6
Nitratos	0,86	0,1	96	9,6
Fosfatos	0,19	0,1	92	9,2
Temperatura	22,8	0,1	89	8,9
Turbiedad	7,88	0,08	80	6,4
Solidos totales	93,5	0,08	84	6,72
% Sat Oxígeno	55,4	0,17	51	8,67
<b>Σ Si*Wi</b>				<b>70,85</b>

Fuente: Autor

**Descripción.** El índice de calidad NSF muestra para el embalse La Chapa, una descripción de agua de calidad regular entre un rango de 51 – 70, este valor se debe a la presencia de coliformes fecales como lo demuestra los anteriores momentos, pero una disminución marcada de oxígeno disuelto.

## - Índice DINIUS

Tabla 26. Resultado índice Dinius

Parámetro	FEBRERO	DINIUS li <sup>Wi</sup>
Coliformes totales	54	1,48284122
Coliformes fecales	1600	1,53864241
pH	7,15	1,37855926
DBO	2,1	1,58355891
Nitratos	0,4	1,54997324
Temperatura	16,9	1,37724981
Conductividad	227	1,47220397
Color	145	1,25589613
Dureza	124,11284	1,28683471
Cloruros	12,99597	1,48520224
Alcalinidad	106	1,29266083
% Sat Oxígeno	73	1,61319563
<b>Producto de li<sup>Wi</sup></b>		<b>77,8196427</b>

Fuente: Autor

- **Descripción.** El índice de calidad DINIUS describe al embalse La Chapa, con una calidad de agua entre el rango definido como regular 51 – 80, se encuentra entre los valores más altos del estudio que corresponden a los menores tiempos de residencia.

#### 4.5.10 Momento hidrológico: Alto

##### - Características generales

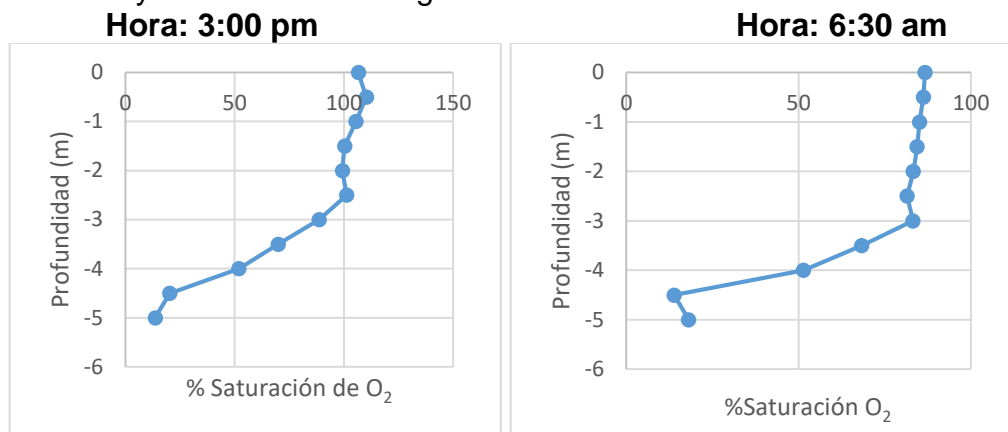
Tabla 27. Características generales

Parámetros	Valor
Coliformes totales NMP/100ml	1600
Coliformes fecales NMP/100ml	140
pH	8,76
DBO mg/L DBO	0,85
Nitratos mg/L NO <sub>3</sub>	0,5
Fosfatos mg/L PO <sub>4</sub>	0,19
Temperatura °C	21,2
Turbiedad UNT	9,54
Sólidos totales mg/L ST	98,7
Conductividad us/cm	146,2
Color	148
Dureza mg/L CaCO <sub>3</sub>	20,0182
Cloruros mg/L Cl <sup>-</sup>	7,99752
Alcalinidad mg/L	0,52
% Sat de oxígeno	49,3
DQO (mg/L)	1,03
Profundidad Secchi (m)	0,75

Fuente: Autor

## - Comportamiento de oxígeno disuelto y temperatura en el embalse La Chapa

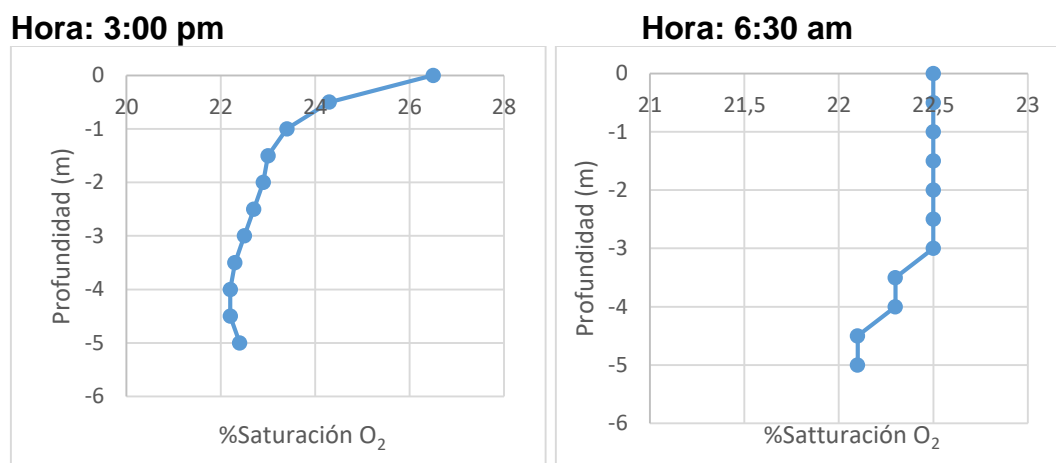
Graficas 15 y 16. Perfiles de oxígeno



Fuente: Autor

- **Descripción.** Este momento representa una concentración uniforme hasta los 3 m de profundidad en los perfiles, se presenta una disminución en un 60 % de oxígeno hasta alcanzar condiciones cercanas a las anaeróbicas.

Gráficas 17 y 18. Perfiles de temperatura





En el perfil de las 6:30 am muestra una temperatura máxima en la superficie de 22,5 y una variación hacia el fondo de 0,5 °C lo que muestra un perfil mayormente mezclado con una diferencia baja entre zonas.

#### - Índice NSF 1984

Tabla 29. Resultado índice NSF 1984

Parámetro	Medida	Valores NSF Wi	Valor Si	Si*Wi
Coliformes Fecales	140	0,15	41	6,15
pH	8,76	0,12	84	10,08
DBO	0,85	0,1	96	9,6
Nitratos	0,5	0,1	97	9,7
Fosfatos	0	0,1	100	10
Temperatura	21,2	0,1	89	8,9
Turbiedad	9,54	0,08	78	6,24
Solidos totales	93,5	0,08	84	6,72
% Sat Oxígeno	49,3	0,17	42	7,14
<b>Σ Si*Wi</b>				<b>74,53</b>

Fuente: Autor

**Descripción.** El índice de calidad NSF muestra para el embalse La Chapa, una descripción de agua de calidad buena entre un rango de 71 – 90, presenta un valor similar al momento bajo, lo que se debe a una menor concentración de oxígeno disuelto, la diferencia entre estos es la cantidad de coliformes fecales la cual es menor en este momento comparado con los demás.

#### - Índice DINIUS

Tabla 30. Resultado índice Dinius

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $i_i^{Wi}$
Coliformes totales	1600	1,42337437
Coliformes fecales	140	1,59558667
pH	8,17	1,38561845
DBO	0,85	1,58355891
Nitratos	0,5	1,57067271
Temperatura	21,2	1,36795345
Conductividad	146,2	1,43526193
Color	148	1,25836698
Dureza	20,0182	1,3675561
Cloruros	7,99752	1,47423994

Parámetro	FEBRERO	DINIUS $li^{wi}$
Alcalinidad	26	1,30811132
% Sat Oxígeno	49,3	1,53501333
Producto de $li^{wi}$		<b>78,2858192</b>

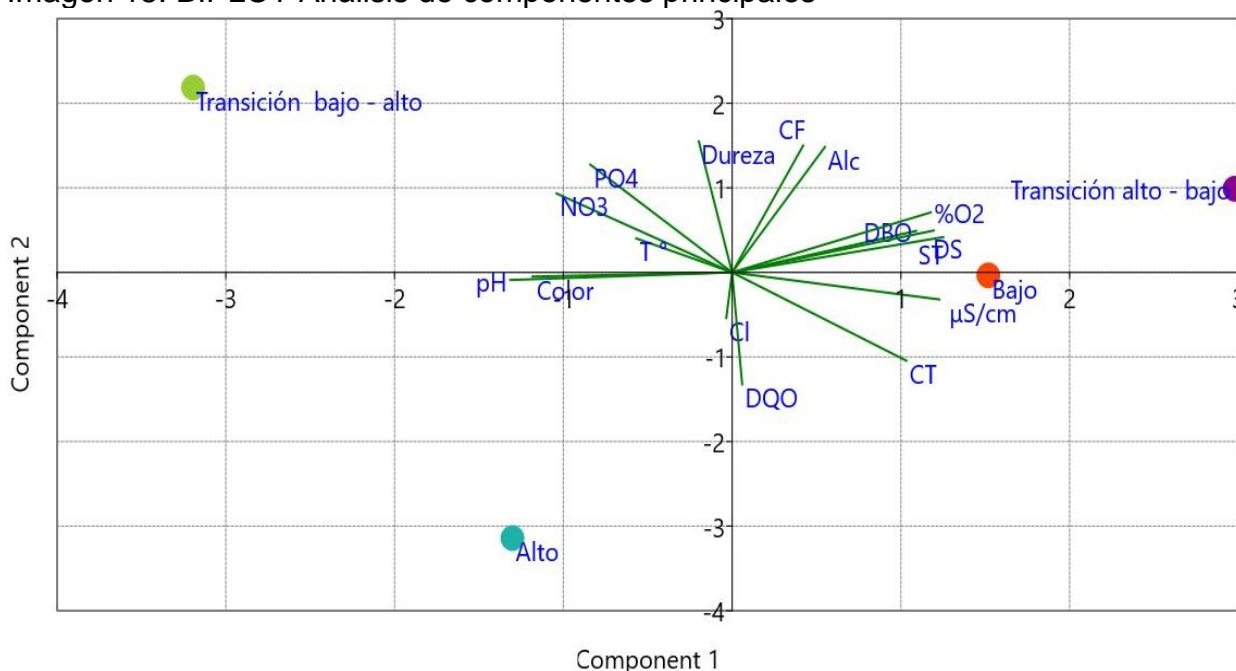
Fuente: Autor

- **Descripción.** El índice de calidad DINIUS describe al embalse La Chapa, con una calidad de agua entre el rango definido como bueno 71 - 90, este momento hidrológico presenta un comportamiento parecido al anterior, pero evidenciamos un proceso de disolución en parámetros como dureza, alcalinidad y coliformes fecales. Lo que lo hace el parámetro de mayor valor de calidad del estudio.

#### 4.6 RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL EMBALSE LA CHAPA.

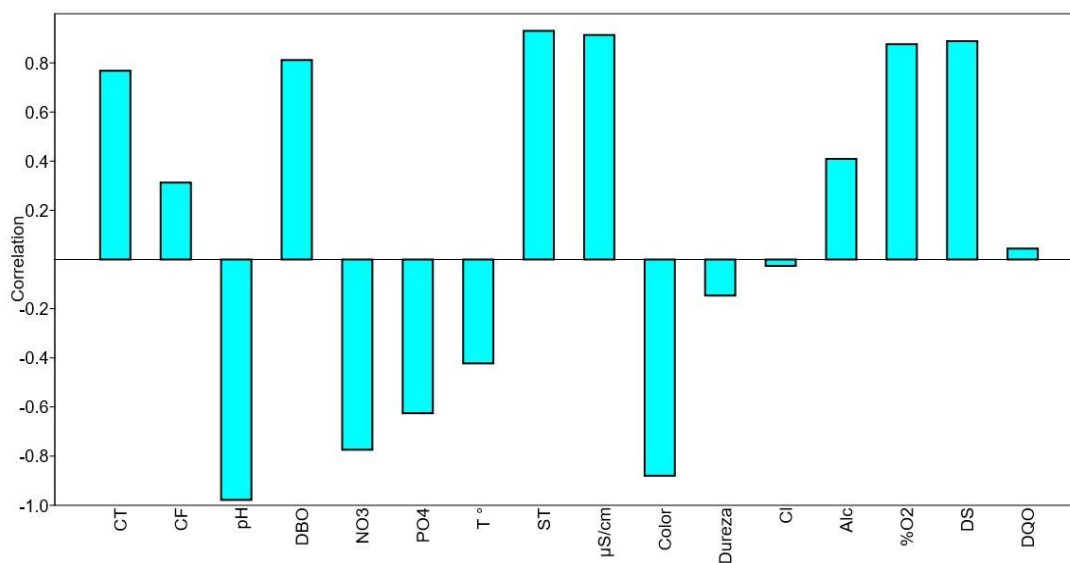
A continuación, se muestra el análisis de componentes principales el cual ayudo a la reducción de la información de parámetros físicos y químicos, para una mejor interpretación con respecto a dos componentes que explican el 75 % de la varianza, en relación con cada momento hidrológico.

Imagen 15. BIPLLOT Análisis de componentes principales



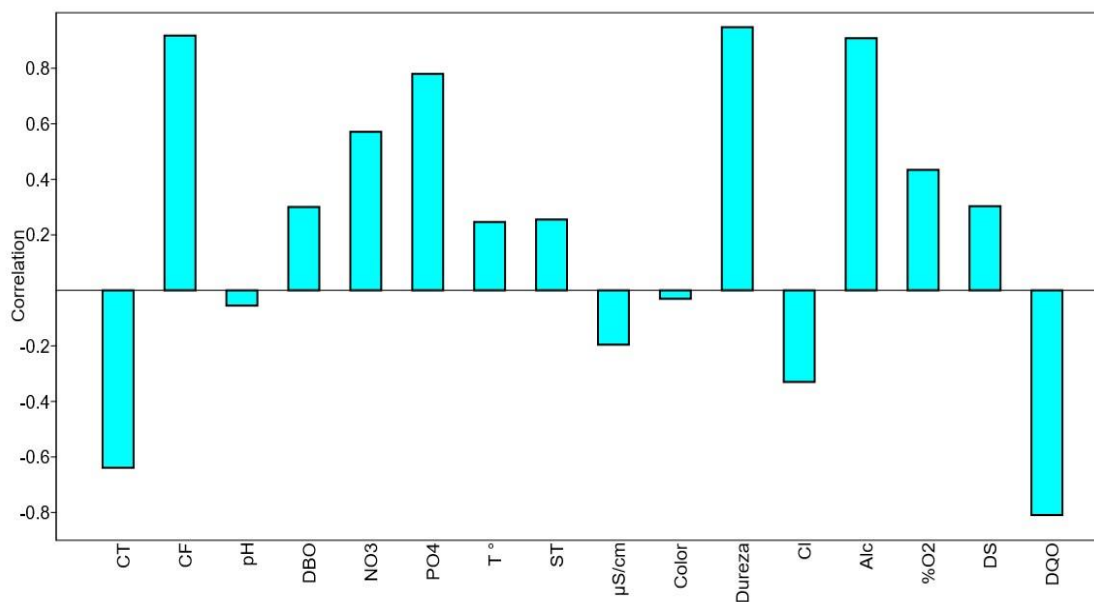
Fuente: Autor – PAST 3

Imagen 16. Barras de correlación componente 1



Fuente: Autor – PAST 3

Imagen 17. Barras de correlación componente 2.



Fuente: Autor – PAST 3

Tabla 31. Valores de correlación entre variables por componentes

	PC 1	PC 2
CT	0.76794	-0.63857
CF	0.31294	0.91754
pH	-0.97799	-0.054906
DBO	0.8112	0.3002
NO3	-0.77376	0.57086
PO4	-0.62508	0.77948
T °	-0.42278	0.24628
ST	0.93026	0.25506
µS/cm	0.91335	-0.19575
Color	-0.87954	-0.030035
Dureza	-0.14684	0.948
Cl	-0.025928	-0.32991
Alc	0.40909	0.90787
%O2	0.87555	0.43398
DS	0.88831	0.30306
DQO	0.04418	-0.80905

Fuente: Autor – PAST 3

El Análisis de componentes principales se realiza para identificar la relación existente sobre los parámetros en este caso físico químicos definidos, se obtuvieron dos componentes que describen el 80 % de la varianza entre los componentes, esta varianza se divide en el componente uno que describe el 48% y el componente dos que describe el 32%, según se evidencia en la imagen BIPLLOT, la separación de cada momento hidrológico indica la disimilaridad entre estos, lo que nos indica características únicas para cada uno, para la lectura de esta gráfica se interpreta primero de forma horizontal, donde se destaca la separación de los momentos hidrológicos, Transición de alto - bajo, bajo y los momentos transición de bajo – alto y alto, la longitud de los vectores de cada variable muestra la correlación y los ángulos entre vectores en cómo se encuentran relacionadas, para ayudar a la interpretación del PCA se presenta los diagramas de barras y valores de correlación, la correlación puede presentarse negativa o positiva y la mayor correlación la describe los valores mayores.

Componente 1: En el componente 1 la variable que presenta la mayor correlación es solidos totales ST, con un valor de 0,930 y la conductividad con un valor de correlación de 0.913, estos componentes como muestra la Grafica se encuentra en mayor relación con los momentos T A-B Y B. La menor correlación en este componente la representa DQO y coliformes totales

Componente 2: En este componente la variable que presenta la mayor correlación corresponde a dureza 0,948, coliformes fecales CF 0,917 y alcalinidad 0,907.

Para el momento hidrológico transición de alto – bajo (TAB) se presenta una correlación positiva para solidos totales ST, saturación de oxígeno %O<sub>2</sub> y profundidad Secchi SD y una correlación negativa para pH y color.

EL momento hidrológico BAJO (B) presenta una correlación positiva para conductividad, solidos totales, profundidad secchi y una correlación negativa para fosfatos PO<sub>4</sub> y nitratos NO<sub>3</sub>.

El momento hidrológico transición bajo – alto (TBA) presenta una correlación positiva para el nitrógeno NO<sub>3</sub>, el fósforo PO<sub>2</sub> y la dureza, y una correlación negativa para coliformes totales y conductividad.

El momento hidrológico alto (A) presenta una correlación positiva o más cercana son el pH y el color y las correlaciones negativas corresponden a la alcalinidad y los coliformes fecales.

#### 4.7 INDICE DE ESTADO TROFICO

Para los valores de profundidad secchi y fosfatos se determinó el estado trófico aplicando las ecuaciones ya definidas. Ver anexo 4.

Tabla 32. Valor índice de estado trófico por momentos hidrológicos

Parámetro	Alto - bajo	Bajo	Bajo - alto	Alto
Profundidad Secchi SD	44,9171	50,7668	54,92	54,92
Fosfatos (PO <sub>4</sub> -P)	68,843	64,69	91,322	78,843

Fuente: Autor

Los valores para el estado trófico hallados se dividen en dos, para los momentos TAB con una profundidad secchi de 1,5 m Y B con una profundidad secchi de 1 m, se presentan valores del índice de estado trófico que definen al embalse con un estado mesotrófico, lo cual concuerda con los rangos de transparencia para una profundidad secchi entre 0,81 a 1,59.

Para los momentos de TBA y B con una profundidad secchi de 0,75 m, se presentan valores de 54,92, los cuales corresponden al rango de estado eutrófico, lo que concuerda con los rangos para definir estado trófico usando la profundidad secchi de <0,8m que los define como eutrófico.

Sin embargo, aplicando el índice de estado trófico para fosfatos, indica que para todos los momentos hidrológicos estudiados se presenta un estado eutrófico.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan y discuten los resultados de la información obtenida en el desarrollo del estudio en el embalse La chapa, durante el periodo, diciembre de 2017 a mayo de 2018, los cuales se presentan abordando, los temas de análisis físico químico, estado trófico, estabilidad térmica, calidad de agua en función de uso y la comparación de dichos temas entre momentos hidrológicos.

### 5.1 MOMENTOS HIDROLÓGICOS

Los cambios de nivel, volumen, caudales de entrada y salida y principalmente el tiempo de residencia, ordenados en 4 momentos hidrológicos se encuentran asociados a los periodos climáticos del área de estudio, la cual presenta un modelo bimodal con sus respectivas transiciones.

Los valores de precipitación describen los valores de volumen, lo que se evidencia con datos de mayores precipitaciones, mayor cantidad de volumen almacenado, en menor precipitación menor cantidad de volumen almacenado. Por otro lado, los valores de precipitación se comportan inversamente con los de tiempo de residencia, lo que se debe a que un mayor flujo de agua dentro del embalse, va a generar un menor tiempo de residencia del agua retenida

Momento hidrológico de transición de alto a bajo .

En este momento los perfiles de temperatura muestran una diferencia de 4°C de superficie a fondo, desde una temperatura máxima de 28°C lo que se define como estratificación térmica, la cual se debe al efecto que tiene la temperatura sobre la densidad, generando diferencias entre profundidades y de esta forma generando una barrera física a la mezcla<sup>67</sup>, la cual no se comporta de forma uniforme en los rangos de temperatura, si no que en temperaturas más elevadas se requiere una mayor energía para romper la mezcla, en este caso se requiere 31 veces más energía para romper la mezcla que en aguas con temperaturas de 4 – 5°C<sup>68</sup>.

Proceso que se ve desdibujado en el perfil de las 6:30 am ya que se evidencia una mezcla hasta los 3,5 m de profundidad y una variación de 2°C hasta el hipolimnion, dicho comportamiento se debe a las disminución y perdida de calor en la noche. Lo que permite una mayor acción del viento, que busca que esa estructura de estratificación desaparezca en este caso parcialmente<sup>69</sup>. El tipo de termoclina presente en este momento hidrológico recibe el nombre de

---

<sup>67</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p, 159.

<sup>68</sup> ESTEVES & BARBIERO, op.cit, p 158.

<sup>69</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p, 160.

termoclina parental, siempre localizada en el metalimnion, esta es dependiente de los periodos de calma, la duración de los periodos de calentamiento y la frecuencia o magnitud de los periodos de mezcla, donde la acción de esta mezcla empuja el metalimnion y con este la termoclina a mayores profundidades sin desaparecer la estratificación<sup>70</sup>.

- **Momento hidrológico bajo.** En este momento hidrológico se evidencia un típico comportamiento de la termoclina parental, donde el perfil de las 3:00 pm corresponde a una baja influencia del trabajo del viento, en la medida que el viento trabaje y comunique al agua energía cinética turbulenta, la termoclina diurna superficial descenderá en la columna de agua, originándose perfiles como el de las 06:30 am.

- **Momento hidrológico transición bajo – alto**

Para este momento se observa en el embalse la estratificación y desestratificación diaria en la columna de agua, esta estratificación se presenta en el día y se presenta una desestratificación nocturna debido a la perdida de calor en la atmosfera y los procesos ya mencionados en el momento hidrológico bajo<sup>71</sup>, lo que se evidencia con las variaciones en el día de 4°C y después de la noche de 1°C.

- **Momento hidrológico alto.** El comportamiento en este momento hidrológico coincide con los explicados en los momentos anteriores, sin embargo, la desestratificación o mezcla que se produce en la noche presenta, presenta la mayor variación, el sistema se encuentra mezclado y se evidencia una variación de 0,5°C en el hipolimnion, proceso que se relaciona con el flujo presente dentro del embalse, ya que debido a este existe una mayor turbulencia y una energía necesaria para generar mezcla.

El embalse La chapa se encuentra en la clasificación de piso templado pre montano el cual se extiende de 1000 a 2000 msnm, con temperaturas que varían entre 17,5 y 24 °C<sup>72</sup>, es decir que poseen un régimen de temperatura que varían muy poco en el año, los comportamientos de estratificación y mezcla que encontramos aquí tienden a alternarse a lo largo del tiempo, correspondiendo a las condiciones del entorno, que aquí corresponden, a los regímenes de vientos y lluvias<sup>73</sup> y a la relación que se presenta entre estos y la altitud y la profundidad<sup>74</sup>. Características que definen el tiempo de residencia y con esto su directa relación con el comportamiento térmico, como se

---

<sup>70</sup> Ibid, p, 162.

<sup>71</sup> ESTEVES & BARBIERO, op.cit, p 161.

<sup>72</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p,168.

<sup>73</sup> MARQUEZ &GUILLLOT, op.cit, p31

<sup>74</sup> Ibid, p,34.

evidencia en el momento hidrológico de menor tiempo de residencia (alto) que representa el momento de mayor mezcla en el estudio.

Los porcentajes de saturación de oxígeno en el embalse La Chapa presentan un comportamiento parecido en los momentos hidrológicos estudiados, dichos comportamientos diferenciados por la variación de la profundidad máxima, mayor en eventos climáticos húmedos, (momento de transición alto – bajo y Alto), presentan una disminución progresiva hacia el hipolimnion este tipo de perfiles recibe la clasificación de clinógrado, los momentos hidrológicos transición alto- bajo, bajo y transición bajo – alto, presentan condiciones anaeróbicas en el fondo, con valores de o<sub>2</sub> cercanos a 0%, este comportamiento describe las características de lagos tropicales, donde las temperaturas en el fondo generalmente van a ser superiores a 15°C lo que ocasiona una descomposición de materia orgánica en el fondo, consumiendo el oxígeno, , la cual comparada con sistemas templados es de 4 a 0 veces más rápida, por esto se describe que los sistemas tropicales van a tener menor materia orgánica en el fondo y que el déficit de oxígeno se va a presentar independientemente del patrón térmico<sup>75</sup> y del estado trófico de los embalses<sup>76</sup>.

Para los momentos hidrológicos (T A-B, B, T B - A) se evidencias características de aumento de oxígeno en el metalimnion, dicho comportamiento se debe al aumento de la concentración de algas y por esto aumento en la actividad fotosintética<sup>77</sup>

## **5.2. RELACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS EN EL EMBALSE LA CHAPA**

El análisis de componentes principales PCA permitió conocer los parámetros que sintetizan el comportamiento del embalse La Chapa, en los diferentes momentos hidrológicos definidos en el estudio.

El momento de transición de alto – bajo, presenta altas correlaciones para los dos componentes descritos que corresponden a sólidos totales, % oxígeno, dureza, coliformes fecales y alcalinidad.

En el componente 1 los sólidos totales el cual se encuentran correlacionados con el porcentaje de saturación de oxígeno, estos parámetros definen puntualmente la transición de un evento climático húmedo, donde se presenta mayor arrastre de materia orgánica y turbulencia hacia el embalse y de un evento climático seco que se describe con una mayor acción del viento, la conductividad presenta una alta correlación con estos parámetros, lo que describe una naturaleza de los iones presentes en el embalse en este

---

<sup>75</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p,186.

<sup>76</sup> MARQUEZ & GUILLOT, op.cit, p, 44

<sup>77</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p,187.



momento de dominancia  $\text{Na}^+$  y  $\text{CA}^{+2}$  <sup>78</sup> Para este momento existe una correlación negativa para el pH lo que relaciona los altos valores de conductividad a iones  $\text{H}^+$ .

El momento de transición bajo se encuentra correlacionado al componente 1 y al momento de transición alto – bajo, presentan altas correlaciones lo que define un comportamiento similar, para este momento se evidencia una disminución en el volumen y una profundidad máxima de 3,5 m, lo que hace que se presente un proceso de concentración y por esto una correlación alta con los parámetros sólidos totales, conductividad, cloruros, que se relaciona con la conductividad por presentar la mayor cantidad de aniones<sup>79</sup>, de igual forma existe una correlación alta en este momento para coliformes totales, lo que explica la correlación negativa con nitratos ya que bacterias como *Escherichia* utilizan los nitratos como aceptores de hidrogeno en la oxidación de materia orgánica, presentándose procesos de desnitrificación<sup>80</sup>.

Para el momento de transición bajo – alto se presentan altas correlaciones para fosfatos y nitratos y una correlación cercana al componente 2 descrito por la dureza coliformes fecales y alcalinidad. Los valores de dureza presentan una relación directa con el contenido de alcalinidad la cual representa la parte de dureza carbonacea dentro de la dureza total, que se encuentra asociada a nitratos y sulfatos<sup>81</sup>. La presencia de nutrientes dentro de un embalse va a estar delimitada por el tiempo de residencia, en este caso se presentan los valores más elevados de nitratos lo que se relaciona con un proceso de arrastre y concentración de nutrientes, debido a la entrada de caudal proveniente de la quebrada, lo que conduce a un aumento del volumen, pero sin fluctuaciones de flujo en la salida. El contenido de fosfatos presenta una correlación elevada con el pH lo que se debe a que la disponibilidad de este va aumentar en pH básicos.

En el periodo de transición alto no se evidencian correlaciones positivas marcadas, sin embargo, presenta correlaciones negativas marcadas con coliformes fecales, alcalinidad dureza, esas correlaciones se deben al incremento de flujo dentro del embalse, procesos dilutivos, eventos climáticos húmedos y un tiempo de residencia menor.

### 5.3. ESTADO TRÓFICO

La clasificación del estado trófico de un cuerpo de agua involucra el establecimiento de niveles basados en el grado del proceso de eutroficación o enriquecimiento del medio acuático por nutrientes, en este análisis se utilizó

---

<sup>78</sup> Ibid, p, 225.

<sup>79</sup> Ibid, p, 236

<sup>80</sup> Ibid, p, 246

<sup>81</sup> Ibid, p, 232.

los valores de fosfatos y la profundidad secchi, valores que se dividen según el momento hidrológico, donde se evidencia que para los momentos de transición alto – bajo y bajo, valores dentro del rango 44 – 54<sup>82</sup> que se clasifica como mesotrófico el cual presenta características medias de productividad para un rango de profundidad de 0,75 y 1,5 m. Para los momentos de transición bajo- alto y alto el índice de estado trófico se encuentra en un rango de >54 y se clasifica como eutrófico.

La utilización de fosfatos presentes en el embalse para definir el estado trófico determinó un estado definido como eutrófico, esto se debe a que el contenido de fosfatos en el embalse es alto con respecto a los valores encontrados en embalses tropicales<sup>83</sup>

#### **5.4. INDICES DE CALIDAD DE AGUA**

La quebrada La Chapa presenta una buena calidad de agua basándonos en los rangos propuestos por el índice NSF. Para el índice DINIUS presenta un rango menor de calidad, describiéndola como agua de calidad regular, dichos valores, se deben a que la quebrada presenta valores altos de dureza, sólidos totales y por ende conductividad, estos valores bajos también se deben a la presencia de coliformes fecales y totales.

Los índices de calidad de agua implementados en este estudio muestran para el índice NSF 1984 rangos entre 70 y 75 lo que corresponde según el anexo 5, a la descripción del recurso hídrico entre las categorías aceptable y dudosa<sup>84</sup>, o definida también como buena y media<sup>85</sup>.

Para el momento hidrológico de transición de alto – bajo se presenta una clasificación buena para el índice NSF y regular para el índice DINIUS, estos valores se relacionan con % de saturación alto de oxígeno debido a la transición de eventos climáticos húmedos a secos, sin embargo, este proceso de arrastre y la concentración por el tiempo de residencia genera valores elevados en los coliformes totales y fecales. Importantes para la salud pública. El menor valor de calidad de agua se da en el momento hidrológico de transición de bajo – alto, lo que se debe principalmente a la disminución del oxígeno presente, siendo este el parámetro con el peso ponderado más alto, lo que se relaciona con el aumento del tiempo de residencia y la menor circulación dentro del embalse.

Comportamiento que se confirma comparando la calidad de agua en el momento hidrológico alto donde el tiempo de residencia corresponde al menor dentro del estudio y se presenta una calidad de agua mayor, sin embargo,

---

<sup>82</sup> HENAO, A, et al, EL DISCO SECCHI Y EL ESTADO TROFICO, 1987, p, 67.

<sup>83</sup> ROLDAN & RAMIREZ, op.cit, p,248.

<sup>84</sup> GONZALES, V et al, p.5.

<sup>85</sup> RAMIREZ, p, 47.

debe mencionarse que, al ser una fuente directa para el consumo humano, presenta una calidad media, lo que se debe principalmente a la presencia de coliformes fecales y sólidos totales.

El índice DINIUS presenta un rango entre 66 y 79 definiendo la calidad de agua según el anexo 3, como regular, lo que se debe a que los parámetros de mayor importancia que presenta son para coliformes fecales y oxígeno disuelto. En este índice la calidad se relaciona con el tiempo de residencia y la circulación dentro del embalse lo que sustenta positivamente la influencia de estos procesos físicos dentro de la calidad de agua.

El índice DINIUS además de presentar un rango de calidad de agua presenta los posibles usos dependientes de esta clasificación, ver anexo 3. El rango de calidad de agua demuestra que para el uso como suministro público de agua es necesario la aplicación de tratamiento debido a la presencia de coliformes, evitando un deterioro gradual en la calidad.

Para el uso recreativo es aceptable pero con restricciones ya que la presencia de coliformes totales puede producir efectos adversos a la salud, este uso recreativo secundario hace referencia a actividades como pesca recreativa, canotaje, navegación, donde la probabilidad de ingerir cantidades apreciables de agua es muy baja<sup>86</sup>.

El hábitat para peces presenta mayores restricciones basándose en las características del agua del embalse, ya que el valor máximo para coliformes fecales es de 14/100 ml, ya que la presencia de bacterias, patógenos y virus tienden a concentrarse en los organismos acuáticos, provocando enfermedades en el momento de la ingestión, con respecto a este uso debe tenerse en cuenta parámetros como concentración de mercurio, cadmio, plomo y otros metales. Para este uso no se presentan valores en otros parámetros ya que van a ser diferentes dependiendo de la especie<sup>87</sup>.

El uso en agricultura e irrigación este recurso también presenta restricciones debido a las concentraciones de coliformes fecales las cuales deben presentarse en valores < 1000(NMP/100ml)<sup>88</sup> valor que se cumple únicamente en el momento hidrológico alto donde se presenta un valor de 140 (NMP/100ml). Para la generación de energía hidroeléctrica en este tipo de agua presenta únicamente restricción en sólidos totales, ya que la presencia de altas cantidades de sedimentos puede disminuir la vida útil del embalse. Para otros usos como procesos industriales, Explotación mecánica de materiales de construcción, asimilación de desechos y enfriamiento de agua en la industria, no se presenta ninguna restricción

---

<sup>86</sup> SIERRA, p.133.

<sup>87</sup> P,132

<sup>88</sup> P,126-127.

## 6. CONCLUSIONES

Los tiempos de residencia en el embalse La Chapa, representan un parámetro directamente relacionado con los cambios estacionales de la región, particularmente en el embalse La Chapa.

El embalse la chapa actúa como un reactor o un recolector de momentos donde los parámetros físico químicos son respuesta a las variaciones del tiempo de residencia, este proceso se encuentra más marcado en el momento hidrológico alto que presenta el menor tiempo de residencia generando un proceso de dilución y una diferencia en variables explicativas como sólidos totales, dureza, fósforo y alcalinidad, los cuales presentan valores altos en los momentos hidrológicos con tiempos de residencia mayores como el momento hidrológico de transición de alto a bajo, el cual presenta correlaciones altas para los anteriores parámetros según el análisis de componentes principales, en donde muestra correlaciones graduales de mayor a menor tiempo de residencia.

El embalse La Chapa se encuentra estratificado en el día y en la noche se rompe la estratificación presentando un sistema con zonas mayormente mezcladas durante la mañana, sin embargo, las altas temperaturas hacen que la estratificación se presenta cerca de la superficie y la diferencia de densidades genere una resistencia a la mezcla.

El tiempo de residencia controla los procesos de estratificación dentro del embalse La Chapa, un menor tiempo de residencia se relaciona con una mayor energía suficiente para tener una disminución en la profundidad de la termoclina, una zona mezclada, y una mayor disolución de zonas anaerobias en el fondo.

Los índices de calidad de agua describen el recurso en el embalse La Chapa en un rango de media a buena, los parámetros físicos y químicos medidos presentan valores comunes a embalses tropicales, pero la presencia de coliformes totales, fecales y la variación de la saturación del oxígeno, limita los posibles usos del recurso del embalse.

El tiempo de residencia es la variable más relevante para describir la calidad de agua en diferentes momentos en los embalses y debe ser determinado en los sistemas que sirvan como fuente de abastecimiento del recurso, debido a que, por la naturaleza de uso del embalse, las características que definen la calidad van a acentuarse más en tiempos de residencia más largos que se relacionan con la mayor extracción controlada de recursos hacia los acueductos.

El recurso hídrico del embalse La Chapa presenta valores altos de sólidos totales, dureza, alcalinidad, conductividad, en tres de los momentos hidrológicos, lo que puede presentar procesos altos de sedimentación dentro del embalse disminuyendo la vida útil de este

Los parámetros medidos hacen parte de condiciones normales o bajas dentro del sistema, sin embargo, la presencia de coliformes totales y fecales debe ser de interés público teniendo en cuenta el hecho que el embalse sirve de fuente de agua de consumo al sector rural y no se realiza ningún tipo de tratamiento. Basándonos en la normativa vigente en calidad de agua (Res 2125 de 2007) para consumo humano evidenciamos que los valores de los parámetros fisicoquímicos se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles.

## **7. RECOMENDACIONES**

Se sugiere realizar el análisis de la influencia de los cambios de tiempo de residencia en un periodo anual, para identificar las variaciones determinadas por los cambios estacionales del segundo periodo del año, donde se presentan las mayores precipitaciones.

Se sugiera la medición de la influencia del viento como parámetro regulador de mezcla del embalse asociado a momentos hidrológicos y eventos climáticos.

Se sugiere realizar un estudio de calidad de agua que evidencie las diferencias que se presentan en el embalse de superficie y fondo, debido a que los embalses presentan grandes cantidades de materia orgánica sedimentada y tendencia a la estratificación lo que puede producir una alteración importante en el recurso en el caso de que se produzca mezcla con el fondo a lo largo del año.

El estudio de calidad de agua debe incorporar mayores parámetros que puedan describir de mejor forma el comportamiento del embalse, se sugiere agregar parámetros como solidos suspendidos, solidos sedimentables, fosforo total, sulfatos y metales pesados

Debido a las altas concentraciones de solidos totales en el embalse, se recomienda realizar estudios de la entrada de sedimentos, debido a que este es el principal parámetro que va a influir en la vida útil del embalse.

Se recomienda al municipio realizar un seguimiento continuo de calidad de agua, así como de niveles y volúmenes suministrados por el Embalse, para que en un futuro se pueda, mediante el uso de registros de datos climatológicos realizar ajustes a los balances hídricos del embalse, los tiempos de residencia y su efecto en la calidad del agua.

Se recomiendo la realización de dichos estudios en periodos más cortos donde se pueda evidenciar la variación presente entre momentos hidrológicos y una descripción más detallada del comportamiento del embalse.

Basándonos en los resultados de calidad de agua se recomienda al municipio la inclusión de pre tratamientos en la quebrada la chapa, que disminuyan la entrada de solidos totales al embalse, de igual forma se recomienda implementar tratamiento para el acueducto comunitario rural, debido a la presencia de coliformes fecales y totales.

## BIBLIOGRAFÍA

AFANADOR, José, pH EN AGUA POR ELECTROMETRIA, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007, p. 2

agua potable y saneamiento básico Ras – 2000, Sección II, Título E, Bogotá, 2000, p,58.

AMBROSETTI, Walter, et al, Residence time and physical processes in lakes, Management, Education, J. Limnol., 62 (Suppl. 1): 1-15. 2003

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION,, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999 541 pages , p.195.

ARANGO, C, et al, Climatología Trimestral del Colombia, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático, Subdirección de Meteorología – IDEAM, p. 5.

ARANGUREN-RIAÑO NJ, MONROY-GONZÁLEZ JD. Respuestas del zooplankton en un sistema tropical (embalse La Chapa, Colombia) con alta tensión ambiental. Acta biol. Colomb. 2014;19 (2) :281-290.

BOJACA, Pilar, PSO DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD POR POTENCIOMETRIA, 2005, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8.

CARPIO, Tania, SÓLIDOS TOTALES SECADOS A 103 – 105°C, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8 páginas, p,2.

CHAPAPRÍA, V, et al, Levantamientos y seguimientos topo-batimétricos en ingeniería de costas, 1995, Ingeniería del Agua. Vol. 2, Universidad politécnica de valencia, p,183.

COLE. G.A, MANUAL DE LIMNOLOGIA, BUENAIRES, 239 p.

CORPOBOYACA, Formulación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Suarez, mapa de erosión, diciembre, 2011.

DINIUS, S.H, Desing of an index of water quality, water resources bulletin american water resources association, Vol 23, No. 5, octubre 1987, p,1.

ESTEVES &BARBIERI, Fundamentos de limnología, a radiacao solar e seus

efeios em ecossistemas aquáticos continentais, p,157.

FRAILE, Henar, et al, 2008, Seguimiento de la calidad de un embalse de abastecimiento de agua potable según las directrices de la Directiva Marco (embalse del Anarbe. Cuenca Norte), Revista Limnética, 27 (2): 211-226 páginas, p.213, Asociación Ibérica de Limnología, Madrid. España. ISSN: 0213-8409

FRANCISCO-NICOLAS, Néstor et al. Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. Terra Latinoam [online]. 2010, vol.28, n.1, pp.71-78.

GAITAN, María, Determinación De Oxígeno Disuelto Por El Método Yodométrico Modificación De Azida, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004, 9 p.

GUZMÁN, D. et al. Regionalización de Colombia según la Estacionalidad De La Precipitación Media Mensual, a Través del Análisis de Componentes Principales (ACP), Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático – Subdirección de Meteorología –IDEAM, 2014. p.49.

HENAO, A, et al, EL DISCO SECCHI Y EL ESTADO TROFICO, 1987, p, 67.

JIMENEZ, H, HIDROLOGIA BASICA, 1986, Universidad del valle, Facultad de ingeniería, Departamento de mecánica de fluidos, 2 da edición, p, 13.

LAVAO, S, & CORREDOR, J, Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. caso de estudio: cuenca del río Murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica, Universidad Militar Nueva Granada, 2014.

LUTZ, Donna, Calculating NSF Water Quality Index, [http://home.eng.iastate.edu/~dslutz/dmrwqn/water\\_quality\\_index\\_calc.htm](http://home.eng.iastate.edu/~dslutz/dmrwqn/water_quality_index_calc.htm), 2011, visitado el 20/03/2018

MARGALEF, Ramón. Limnología. Barcelona: Ediciones Omega, S.A. 1983. p.789.

MARQUEZ, German y GUILLOT, Gabriel. Ecología y efecto ambiental de embalses tropicales Aproximación a casos colombianos, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Instituto de Estudios Ambientales: Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, 2001.

MAYS, Larry. Water Resources Engineering: Second Edition. Tempe Arizona: John Wiley & Sons, Inc, 2010. p.890.



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2003, Seguimiento de la calidad de las aguas en embalses de zonas sensibles, Documento de síntesis, Gobierno de España, 96 páginas, p.5.

Ministerio Del Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, 2006, Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Santana – Boyacá, 140 páginas, p.27.

NASCIMENTO, R. F. F.; ALCÂNTARA, E.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Caracterização limnológica do reservatório hidrelétrico de Itumbiara, Goiás, Brasil. Ambi-Agua, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 143-156, 2011.

NAVARRO, María, Demanda Bioquímica De Oxígeno 5 Días, Incubación Y Electrometría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 13 páginas, p.2.

NAVARRO, María, Determinación De Escherichia Coli Y Coliformes Totales En Agua Por El Método De Filtración Por Membrana En Agar Chromocult, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 8 páginas, p.2. 17 páginas, p.2.

ORAM, Brian, Monitoring the Quality of Surface Waters, wáter research wáter, <https://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>, 2014, visitado el 20/03/2018

RODRIGUEZ, Carlos, Demanda Química De Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 11 páginas, p.2.

RODRIGUEZ, Carlos, Dureza Total En Agua Con EDTA Por Volumetría, 2007, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 12 páginas, p.2.

ROLDAN G, RAMIREZ J, Fundamentos de limnología neotropical, 2008, 2º edición. p. 125

RUEDA, Francisco, et al, The residence time of river wáter in reservoirs, Elsevier, Ecological modeling, science direct, 2005.

SANABRIA, Doris, Fósforo Total En Agua Por Digestión Ácida, Método Del Ácido Ascórbico, 2004, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 14 páginas, p.3.

SIERRA, Carlos, Calidad del agua (evaluación y diagnostico), Universidad de

Medellín, ediciones de la u, 1ª edición. 2011. p.115.

SIERRA, E, Eutrofización de embalse, descripción, prevención y manejo, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2010, p,27

SKOLOV, A & CHAPMAN, T.G, Métodos de cálculo del balance hídrico, Guía internacional de investigación y métodos, Instituto de hidrología de España y organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura, 1981, p, 143.

TUNDISI, J. G, Recursos hídricos no futuro:problemas e soluções, estudos avançados 22 (63), 2008

WETZEL, Robert, Limnology, Lake and River Ecosystems, Third Edition, San Diego California, Academic Press, 2001.

WILLS, Martin, application of the national sanitation foundation water quality index in the cazenovia creek, ny, pilot watershed management Project, Middle States Geographer, 1996:95



# **ANEXOS**

#### **Anexo A. Pesos utilizados para el índice NSF 1984**

<b>Variable</b>	<b>Valor Wi NSF (1978)</b>
<b>Oxígeno disuelto (%)</b>	0,17
<b>Coliformes fecales</b>	0,15
<b>pH</b>	0,12
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	0,10
<b>Nitratos</b>	0,10
<b>Fosfatos</b>	0,10
<b>Temperatura</b>	0,10
<b>Turbiedad</b>	0,08
<b>Solidos totales</b>	0,08

Fuente: Tomado de Gonzales Meléndez et al 2013

## Anexo B. Ecuaciones índice DINIUS

Parámetros	Ecuación
OD	$(0.82+10,56)^{0,109}$
DBO	$((108\text{DBO})^{-0,34})^{0,097}$
CT	$((136\text{CT})^{-0,1311})^{0,90}$
CF	$((106\text{CF})^{-0,1286})^{0,116}$
Alcalinidad	$((110\text{ALK})^{-0,1342})^{0,63}$
Dureza	$((552\text{HA})^{-9,4488})^{0,65}$
Cloruros	$((391\text{CL})^{-0,3480})^{0,074}$
Conductividad	$((506\text{Cond})^{-0,3315})^{0,079}$
pH	$(1)^{0,77}$
NO <sub>3</sub>	$((126\text{N})^{-0,2718})^{0,90}$
Temperatura	$(10^{2,004-0,0382 ta-ts })^{0,77}$
Color	$(127\text{C})^{-0,2394})^{0,093}$

Fuente: Dinius. S. 1987

## Anexo C. Clasificación de calidad de agua según uso DINIUS

LEVEL OF POLLUTION (100=Best)	WATER USES					
	Public Water Supply	Recreation	Fish	Shellfish	Agricultural	Industrial
100	PURIFICATION NOT NECESSARY	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	PURIFICATION NOT NECESSARY	PURIFICATION NOT NECESSARY
90	MINOR PURIFICATION REQUIRED	FOR ALL WATER	FOR ALL FISH	FOR ALL SHELLFISH	MINOR PURIFICATION FOR CROPS REQUIRING HIGH QUALITY WATER	MINOR PURIFICATION FOR INDUSTRIES REQUIRING HIGH QUALITY WATER
80	NECESSARY TREATMENT	SPORTS				
70	BECOMING MORE EXTENSIVE	BECOMING POLLUTED STILL ACCEPTABLE BACTERIA COUNT	MARGINAL FOR SENSITIVE FISH	MARGINAL FOR SENSITIVE SHELLFISH	NO TREATMENT NECESSARY FOR MOST CROPS	NO TREATMENT NECESSARY FOR NORMAL INDUSTRY
60			DOUBTFUL FOR SENSITIVE FISH	DOUBTFUL FOR SENSITIVE SHELLFISH		
50	DOUBTFUL	DOUBTFUL FOR WATER CONTACT	HARDY FISH ONLY	HARDY SHELLFISH ONLY	EXTENSIVE TREATMENT FOR MOST CROPS	EXTENSIVE TREATMENT FOR MOST INDUSTRY
40		ONLY BOATING NO WATER CONTACT	COARSE FISH ONLY	COARSE SHELLFISH ONLY		
30	NOT ACCEPTABLE	OBVIOUS POLLUTION APPEARING	NOT	NOT	USE ONLY FOR VERY HARDY CROPS	ROUGH INDUSTRIAL USE ONLY
20		OBVIOUS POLLUTION	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	NOT	NOT
10		-	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE
0		NOT ACCEPTABLE	LE	LE		

Fuente: Dinius. S, 1987

Fuente:

#### **Anexo D. Índice de Carlson para estado trófico IET**

IET	ESTADO TRÓFICO
< 44	Oligotrófico
44 - 54	Mesotrófico
> 54	Eutrófico

Fuente: Henao et al 1987



## Anexo E. Clasificación de calidad de agua índice NSF 1984 – DINIUS

Índice de Dinius (1972)		INSF (1978)			Color
Calidad	Rango	Calidad	Rango	Calidad	
Excelente	91-100	Excelente	91-100	Buena	Blue
Buena	81-90	Buena	71-90	Aceptable	Green
Regular	51-80	Regular	51-70	Dudosa	Yellow
Mala	41-50	Mala	26-50	Crítica	Orange
Muy mala	0-40	Muy mala	0-25	Muy Crítica	Red

Fuente: GONZALEZ et al, 2013

## **Anexos F. Imágenes de campo medio magnético**